

Universidad Carlos III de Madrid

Proyecto Fin de Carrera

*Modelado y simulación del robot
PASIBOT. Estudio de la rigidez y mejora
en la prevención del vuelco lateral*



Víctor Espantoso Miranda

Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica

Tutor del proyecto: Jesús Meneses Alonso

Índice

Índice	2
Índice de imágenes, tablas y gráficas	3
Motivación y objetivos del proyecto	5
Fases del proyecto.....	7
Estructura del documento	8
Capítulo I: Introducción	10
1.1 Historia de la robótica	11
1.2 Los robots bípedos.....	17
1.2.1 Tipos	17
1.2.2 Fundamentos de la marcha bípeda	19
Capítulo II: El robot PASIBOT	22
2.1 Descripción del robot PASIBOT	23
2.1.1 CHEBYSHEV	25
2.1.2 Extensión	27
2.1.3 Estabilización	28
2.1.4 Sistema de transmisión	29
2.1.5 El modelo fabricado.....	30
2.2 Planteamiento del problema	33
Capítulo III: Desarrollo del proyecto	36
3.1 Descripción de las herramientas empleadas	37
3.2 Modelado	39
3.2.1 El modelo real.....	44
3.2.2 El modelo simplificado.....	50
3.3 Solución al problema planteado	51
3.3.1 Mecanismo corrector	51
3.3.2 Modificación de la sección; aumento de rigidez	53
3.3.3 Nuevo diseño del pie	58
Capítulo IV: Análisis y resultados	59
4.1 Posición del c.d.m.....	60
4.1.1 Hipótesis de sólido rígido	60
4.1.2 Colocación del mecanismo corrector	65
4.2 Análisis FEMAP.....	67
4.2.1 Eslabón doble vs dos eslabones.....	67
4.2.2 El modelo simplificado.....	69
4.2.3 Modelo simplificado con mayor rigidez.....	72
4.2.4 Pie de apoyo	74
Capítulo V: Conclusiones y trabajos futuros.....	78
Bibliografía	81
Anexo I, Anexo II	

Índice de imágenes, tablas y gráficas

<i>Imagen 1.1.1: Robot Unimate de Devol</i>	13
<i>Imagen 1.1.2: Robot “Stanford Arm”</i>	14
<i>Imagen 1.1.3: Plataforma exploradora</i>	15
<i>Imagen 1.1.4: Robot P3 de Honda</i>	16
<i>Imagen 1.2.1.1: Diseño de la patente de Wilson Walkie</i>	17
<i>Imagen 1.2.1.2: Robot Rh-0</i>	18
<i>Imagen 1.2.1.3: Robot Rh-1</i>	18
<i>Imagen 1.2.2.1 Ciclo de la marcha</i>	20
<i>Imagen 1.2.2.2: Doble apoyo</i>	20
<i>Imagen 1.2.2.3: Balanceo</i>	21
<i>Imagen 1.2.2.4: Doble apoyo</i>	21
<i>Imagen 2.1.1: PASIBOT</i>	23
<i>Tabla 2.1.1: Nomenclatura piezas PASIBOT</i>	24
<i>Imagen 2.1.1.1 : CHEBYSHEV</i>	25
<i>Imagen 2.1.1.2: Mecanismo creado por CHEBYSHEV</i>	26
<i>Imagen 2.1.1.3: Mecanismo instalado en el robot</i>	26
<i>Imagen 2.1.2.1: Pantógrafo de dibujo</i>	27
<i>Imagen 2.1.2.2: Pantógrafo del PASIBOT</i>	27
<i>Imagen 2.1.3.1: CHEVYSHEV + pantógrafo + estabilizador</i>	28
<i>Imagen 2.1.4.1: Cadera PASIBOT</i>	29
<i>Tabla 2.1.5.1: Propiedades Aluminio</i>	30
<i>Tabla 2.1.5.2: Especificaciones de los rodamientos SKF</i>	31
<i>Imagen 2.1.5.1: Características técnicas del motor</i>	32
<i>Imagen 2.3.1: Vista inferior</i>	33
<i>Imagen 2.3.2: Alzado</i>	33
<i>Imagen 2.3.3: Vista inferior</i>	34
<i>Imagen 2.3.4: Alzado</i>	34
<i>Imagen 3.1.1: Ejemplo de modelo 3D</i>	37
<i>Tabla 3.1.1: Ventajas de la tecnología síncrona</i>	38
<i>Imagen 3.2.1: ventana de inicio SOLID EDGE ST</i>	39
<i>Imagen 3.2.2: Elección de plano</i>	40
<i>Imagen 3.2.3: Boceto “cadera exterior”</i>	40
<i>Imagen 3.2.4: Boceto “biela”</i>	40
<i>Imagen 3.2.5: Extrusión boceto “biela”</i>	41
<i>Imagen 3.2.6: Selección del comando “agujero”</i>	41
<i>Imagen 3.2.7: Opciones de agujero</i>	42
<i>Imagen 3.2.8: Boceto de vaciado</i>	42
<i>Imagen 3.2.9: Operación de vaciado</i>	43
<i>Imagen 3.2.10: Elección del material</i>	43
<i>Imagen 3.2.1.1: Ventana inicio programa</i>	44
<i>Imagen 3.2.1.2: Selección de piezas</i>	45
<i>Imagen 3.2.1.3: Relación “coincidir”</i>	45
<i>Imagen 3.2.1.4: Caras coincidentes</i>	46
<i>Imagen 3.2.1.5: Alineación axial</i>	46
<i>Imagen 3.2.1.6: Insertar tornillos</i>	47
<i>Imagen 3.2.1.7: Piezas ensambladas</i>	47
<i>Imagen 3.2.1.8: “pierna derecha”</i>	48

Modelado y simulación del robot PASIBOT. Estudio de la rigidez y mejora en la prevención del vuelco lateral.

<i>Imagen 3.2.1.9: “pierna izquierda”</i>	48
<i>Imagen 3.2.1.10: “cadera”</i>	48
<i>Imagen 3.1.2.11: Conjunto PASIBOT</i>	49
<i>Imagen 3.1.2.12: Propiedades físicas conjunto PASIBOT</i>	49
<i>Imagen 3.3.1.1: Mecanismo corrector</i>	51
<i>Imagen 3.3.1.2: Desequilibrio producido por el mecanismo</i>	52
<i>Imagen 3.3.2.1: Volumen del eslabón</i>	55
<i>Imagen 3.3.2.2: Eslabón con perfil H</i>	57
<i>Imagen 3.3.2.3: Nuevo diseño de pie</i>	58
<i>Imagen 4.1.1.1: Posición 0 del c.d.m.</i>	60
<i>Tabla 4.1.1.1: Evolución temporal del c.d.m.</i>	61
<i>Tabla 4.1.1.2: Evolución temporal del c.d.m. con valores incrementales</i>	62
<i>Gráfica 4.1.1.1: Evolución temporal c.d.m. con valores incrementales</i>	63
<i>Imagen 4.1.1.2: Posición c.d.m. en plano sagital respecto al pie</i>	64
<i>Gráfica 4.1.2.1: Desequilibrio eje sagital</i>	66
<i>Imagen 4.2.1.1: Deformación dos eslabones</i>	68
<i>Imagen 4.2.1.2: Deformación eslabón doble</i>	68
<i>Imagen 4.2.2.3: Distancia de aplicación del peso</i>	70
<i>Imagen 4.2.2.4: Vista lateral de la deformación en los eslabones</i>	71
<i>Imagen 4.2.2.5: Vista isométrica de la deformación en los eslabones</i>	71
<i>Imagen 4.2.3.1: Modelo simplificado con eslabones H</i>	72
<i>Imagen 4.2.3.2: Vista isométrica del modelo simplificado con eslabones H</i>	73
<i>Imagen 4.2.4.1: Holgura en la unión del pie</i>	74
<i>Imagen 4.2.4.2: Desplazamiento del extremo del eslabón</i>	75
<i>Imagen 4.2.4.4: Vista ampliada de la nueva unión</i>	76
<i>Imagen 4.2.4.3: Unión con nuevo modelo de pie</i>	76
<i>Imagen 4.2.4.5: Análisis tensional sobre pie original</i>	77
<i>Imagen 4.2.4.6: Análisis tensional sobre pie nuevo</i>	77

Motivación y objetivos del proyecto

Cuando se habla de robótica es necesario distinguir entre la robótica industrial, centrada en el estudio de robots manipuladores, y la robótica enfocada al diseño de robots móviles con diferentes grados de autonomía. La primera lleva estudiándose desde los años 50 y forma parte actualmente del tejido industrial de los países desarrollados principalmente en cadenas de montaje, fábricas de automóviles, etc.

Los robots móviles son máquinas que tienen la capacidad de desplazarse de un sitio a otro de forma telecontrolada o autónoma con el objeto de realizar una tarea para la cual han sido diseñados. Sin embargo, los robots móviles actuales no están adaptados al entorno doméstico de los humanos. En este campo han surgido en los últimos años numerosos proyectos encaminados a dotar a los robots de un cierto grado de humanidad, con una morfología similar a la humana y con el objetivo de hacerlos trabajar como robots de servicio en nuestras oficinas o domicilios.

El departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III se incorporó hace ya algún tiempo al desarrollo de la robótica humanoide, fabricando su propio robot humanoide, el Rh-1, dotado con 21 grados de libertad. Por otra parte, el grupo “MAQLAB” del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III ha trabajado en otro proyecto, el desarrollo de un robot bípedo de tamaño natural que cuenta con un único grado de libertad, PASIBOT. Esta característica tan restrictiva de PASIBOT exigió el diseño sumamente preciso de un complejo mecanismo que hiciese caminar al robot con el giro de un pequeño motor eléctrico. El robot PASIBOT fue fabricado en el taller de la Universidad según el diseño ideado por sus creadores. Una vez construido, fue probado y se observó que su funcionamiento no se correspondía con el teórico, sino que en fase de apoyo simple vuelca lateralmente.

La motivación final de la realización del presente proyecto es colaborar en el desarrollo del robot bípedo de la Universidad Carlos III. Formar parte de un proyecto real de ingeniería mecánica y adquirir conocimientos y técnicas científicas aplicadas al campo de la robótica, así como proponer mejoras encaminadas a lograr la resolución de los problemas que se plantean y que afectan directamente al proyecto PASIBOT.

Los objetivos del presente Proyecto Fin de Carrera están englobados dentro del marco de un objetivo principal, solucionar los problemas de estabilidad que presenta el actual modelo de PASIBOT. Estos problemas de equilibrio se concretan en que el robot vuelca al levantar uno de sus pies para iniciar la marcha. Orientados a la consecución del objetivo principal, se detallan a continuación los objetivos que se deben alcanzar en el desarrollo del presente Proyecto Fin de Carrera:

- **Analizar el modelo fabricado de PASIBOT**, asimilar los fundamentos teóricos de su diseño y entender el movimiento que se pretende conseguir.
- Modelar una **copia exacta de PASIBOT utilizando herramientas informáticas**. Esta réplica virtual permitirá realizar el análisis del robot y de sus mejoras sin necesidad de construir costosos prototipos físicos.
- Definir y concretar las **causas del comportamiento inestable del robot** para poder trabajar sobre ellas.
- **Idear soluciones al problema** que se plantea, realizando el diseño y detallando las bases teóricas que avalan estas propuestas.
- Realizar análisis sobre el modelo virtual de PASIBOT para **verificar la exactitud y validez de las mejoras propuestas**. Estos análisis comparativos serán realizados utilizando un software de análisis de elementos finitos.
- Analizar los resultados obtenidos y **extraer conclusiones**.
- Por último se redactará la presente memoria documental del proyecto.

Fases del proyecto

El ciclo de un proyecto de ingeniería se compone de varias fases características no siempre bien diferenciadas, pero que deben ser analizadas individualmente para prever las necesidades básicas de cada una. Estas fases son las siguientes: concepción, viabilización, implantación y operación. Este proyecto, que se enmarca dentro del proyecto global de la Universidad Carlos III de construcción de un robot bípedo, se centra en las fases genéricas de concepción y viabilización que analizamos a continuación:

1. **Definición de objetivos:** En esta primera etapa se plantean la motivación y los objetivos que se han de alcanzar.
2. **Estudios previos:** Se realiza un estudio de referentes, proyectos análogos o robots bípedos ya existentes en el mercado.
3. **Conceptualización y desarrollo de ideas:** En esta fase, el ingenio juega un papel importante. Se analizan los problemas y se plantean las posibles soluciones.
4. **Diseño:** Se realiza el modelado buscando crear una réplica exacta del modelo real.
5. **Simulación:** Se realiza una evaluación de las propuestas desarrolladas.
6. **Conclusiones finales:** Se establecen unas reflexiones sobre el desarrollo del proyecto y el resultado final del mismo.

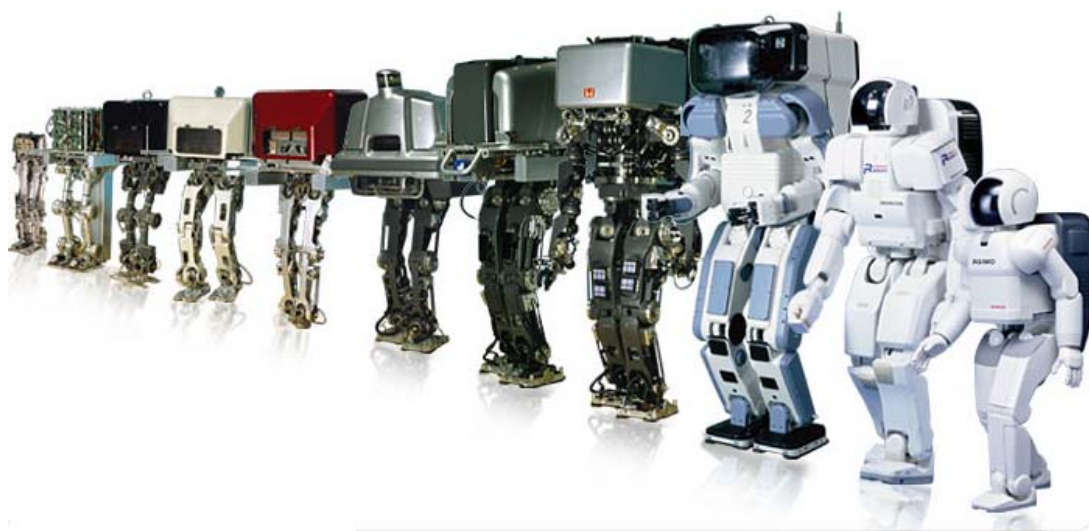
Estructura del documento

La memoria del presente Proyecto Fin de Carrera se ha dividido en cuatro capítulos, dos anexos y una bibliografía.

- **Capítulo I, introducción:** En este primer capítulo se realiza una breve introducción teórica sobre la historia de la robótica en general y de los robot bípedos en particular. Además de la historia, se describen los fundamentos de la marcha bípeda.
- **Capítulo II, el robot PASIBOT:** Se describen todas las partes del diseño original de PASIBOT y se le suministra al lector la base teórica necesaria para entender el mecanismo que hace moverse al robot. En la segunda parte del capítulo se detalla el problema de estabilidad del robot y la causa que lo genera.
- **Capítulo III, desarrollo del proyecto:** En la primera parte de este capítulo se describen de forma breve las herramientas informáticas empleadas en el desarrollo del proyecto. Más adelante se explica la metodología empleada para el modelado de todas las piezas del robot. Se justifica la creación de un modelo simplificado. Por último, se detallan las soluciones propuestas para el problema de estabilidad planteado.
- **Capítulo IV, análisis y resultados:** Se analiza la posición del centro de masas (c.d.m.) del robot bajo la hipótesis de sólido rígido con y sin el mecanismo corrector del desequilibrio. Estos primeros análisis se realizan con los datos obtenidos en SOLID EDGE ST. Para los siguientes análisis se utiliza el programa FEMAP, donde se analizan deformaciones y tensiones en el robot.
- **Capítulo V, conclusiones y trabajos futuros:** Por último, se interpretan los resultados obtenidos y se validan las propuestas de mejora ideadas. Asimismo, se proponen futuras líneas de desarrollo del robot.

- **Anexo I:** Contiene los planos de todas las piezas de PASIBOT, así como explosionado y planos de conjunto.
- **Anexo II:** Incluye los planos del mecanismo corrector.
- **Bibliografía.**

Capítulo I: Introducción



1.1 Historia de la robótica

Durante siglos el ser humano ha construido máquinas que imitan las partes del cuerpo humano. Los antiguos egipcios unieron brazos mecánicos a las estatuas de sus dioses. Los griegos construyeron estatuas que operaban con sistemas hidráulicos, los cuales se utilizaban para fascinar a los adoradores de los templos.

El inicio de la robótica actual puede fijarse en la industria textil del siglo XVIII, cuando Joseph Jacquard inventa en 1801 una máquina textil programable mediante tarjetas perforadas. La revolución industrial impulsó el desarrollo de estos agentes mecánicos, entre los cuales se destacaron el torno mecánico motorizado de Babbitt (1892) y el mecanismo programable para pintar con spray de Pollard y Roselund (1939). Además de esto, durante los siglos XVII y XVIII fueron construidos en Europa muñecos mecánicos muy ingeniosos que tenían algunas características de los robots. Jacques de Vaucansos construyó varios músicos de tamaño humano a mediados del siglo XVIII. Esencialmente se trataba de robots mecánicos diseñados para un propósito específico: la diversión. En 1805, Henri Maillardert construyó una muñeca mecánica que era capaz de hacer dibujos. Una serie de levas se utilizaban como ' el programa ' para el dispositivo en el proceso de escribir y dibujar. Estas creaciones mecánicas de forma humana deben considerarse como inversiones aisladas que reflejan el genio de hombres que se anticiparon a su época[1].

La palabra robot se empleó por primera vez en 1920 en una obra de teatro llamada "R.U.R." o "Los Robots Universales de Rossum" escrita por el dramaturgo checo Karel Capek. La trama era sencilla: el hombre fabrica un robot, después el robot mata al hombre. Muchas películas han seguido mostrando a los robots como máquinas dañinas y amenazadoras. La palabra checa 'Robota' significa servidumbre o trabajador forzado, y cuando se tradujo al inglés se convirtió en el término robot.

Entre los escritores de ciencia ficción, Isaac Asimov contribuyó con varias narraciones relativas a robots, que escribió a partir de 1939. A él se atribuye el acuñamiento del término Robótica. La imagen de robot que aparece en su obra es el de una máquina bien diseñada y con una seguridad garantizada que actúa de acuerdo con tres principios. Estos principios fueron denominados por Asimov las Tres Leyes de la Robótica, y son [2]:

- 1) Un robot no puede actuar contra un ser humano o, mediante inacción, que un ser humano sufra daños.
- 2) Un robot debe obedecer las ordenes dadas por los seres humanos, salvo las que entren en conflicto con la primera ley.
- 3) Un robot debe proteger su propia existencia, a no ser que esté en conflicto con las dos primeras leyes.

Consecuentemente todos los robots de Asimov son fieles sirvientes del ser humano, de ésta forma su actitud contraviene a la de Kapek. Inicialmente, se definía un robot como un manipulador reprogramable y multifuncional diseñado para trasladar materiales, piezas, herramientas o aparatos a través de una serie de movimientos programados para llevar a cabo una variedad de tareas. El desarrollo en la tecnología, donde se incluyen las poderosas computadoras electrónicas, los actuadores de control retroalimentados, transmisión de potencia a través de engranes y la tecnología en sensores, han contribuido a flexibilizar los mecanismos autómatas para desempeñar tareas dentro de la industria. Son varios los factores que intervinieron para que se desarrollaran los primeros robots en la década de los 50. La investigación en inteligencia artificial desarrolló maneras de emular el procesamiento de información humana con computadoras electrónicas e inventó una variedad de mecanismos para probar sus teorías.

Las primeras patentes aparecieron en 1946 con los muy primitivos robots para traslado de maquinaria de Devol. También en ese año aparecen las primeras computadoras: J. Presper Eckert y John Maulchy construyeron el ENAC en la Universidad de Pensilvania y la primera máquina digital de propósito general se desarrolla en el MIT. En 1954, Devol diseña el primer robot programable y acuña el termino "autómata universal", que posteriormente recorta a Unimation. Así llamaría

Modelado y simulación del robot PASIBOT. Estudio de la rigidez y mejora en la prevención del vuelco lateral.

Engleberger a la primera compañía de robótica. La comercialización de robots comenzaría en 1959, con el primer modelo de la Planet Corporation que estaba controlado por interruptores de fin de carrera.

En 1964 se abren laboratorios de investigación en inteligencia artificial en el MIT, el SRI (Stanford Research Institute) y en la universidad de Edimburgo. Poco después los japoneses que anteriormente importaban su tecnología robótica, se sitúan como pioneros del mercado.

Otros desarrollos importantes en la historia de la robótica fueron:

- En 1960 se introdujo el primer robot "Unimate", basado en la transferencia de artículos programada por Devol. Utilizaban los principios de control numérico para el control de manipulador y era un robot de transmisión hidráulica.

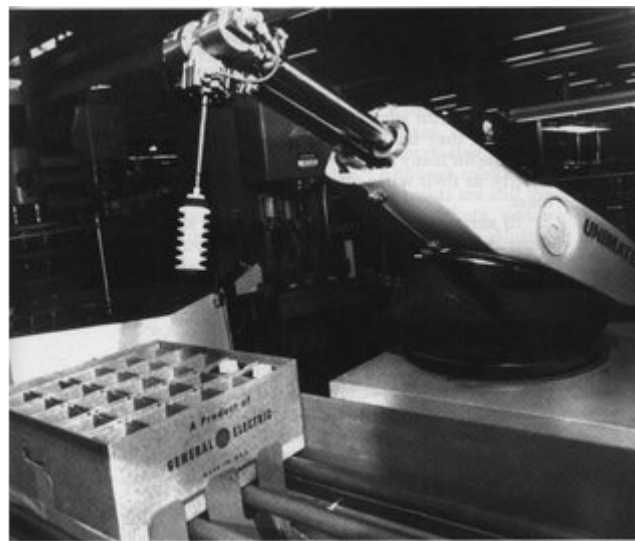


Imagen 1.1.1: Robot Unimate de Devol

- En 1961, un robot Unimate se instaló en la Ford Motors Company para atender una máquina de fundición de troquel.
- En 1966, la firma noruega Trallfa construyó e instaló un robot de pintura por pulverización.

· En 1971 el "Standford Arm", un pequeño brazo de robot de accionamiento eléctrico, se desarrolló en la Standford University.



Imagen 1.1.2: Robot "Standford Arm"

· En 1973 se desarrolló en SRI el primer lenguaje de programación de robots del tipo de computadora para la investigación con la denominación WAVE. Fue seguido por el lenguaje AL en 1974. Los dos lenguajes se desarrollaron posteriormente en el lenguaje VAL comercial para Unimation por Víctor Scheinman y Bruce Simano.

· En 1978 se introdujo el robot PUMA (Programmable Universal Machine for Assambly) para tareas de montaje por Unimation, basándose en diseños obtenidos en un estudio de la General Motors.

· En 1980 un sistema robótico de captación de recipientes fue objeto de demostración en la Universidad de Rhode Island. Con el empleo de visión de máquina el sistema era capaz de captar piezas en orientaciones aleatorias y posiciones fuera de un recipiente[2].

Actualmente, el concepto de robótica ha evolucionado hacia los sistemas móviles autónomos, que son aquellos capaces de desenvolverse por sí mismos en entornos desconocidos y parcialmente cambiantes sin necesidad de supervisión. El primer robot móvil de la historia, pese a sus muy limitadas capacidades, fue ELSIE (Electro-Light-Sensitive Internal-External), construido en Inglaterra en 1953. ELSIE se limitaba a seguir una fuente de luz utilizando un sistema mecánico realimentado sin incorporar inteligencia adicional. En 1968 apareció SHACKY del SRI (standford Research Institute), que estaba provisto de una diversidad de sensores así como una cámara de visión y sensores táctiles y podía desplazarse por el suelo. El proceso se llevaba en dos computadores conectados por radio, uno a bordo.

En los setenta, la NASA inicio un programa de cooperación con el Jet Propulsión Laboratory para desarrollar plataformas capaces de explorar terrenos hostiles. El primer fruto de esta alianza seria el MARS-ROVER, que estaba equipado con un brazo mecánico tipo STANFORD, un dispositivo telemétrico láser, cámaras estéreo y sensores de proximidad.



Imagen 1.1.3: Plataforma exploradora

En los ochenta aparece el CART del SRI que trabaja con procesado de imagen estéreo, más una cámara adicional acoplada en su parte superior. También en la década de los ochenta, el CMU-ROVER de la Universidad Carnegie Mellon incorporaba por primera vez una rueda timón, lo que permite cualquier posición y orientación del plano.

En el campo de los androides cabe mencionar el P3 de Honda que mide 1,60 m, pesa 130 Kg y es capaz de subir y bajar escaleras, abrir puertas, pulsar interruptores y empujar vehículos.



Imagen 1.1.4: Robot P3 de Honda

En general la historia de la robótica puede ser clasificada en cinco generaciones (división hecha por Michael Cancel, director del Centro de Aplicaciones Robóticas de Science Application Inc. En 1984). Las dos primeras, ya alcanzadas en los ochenta, se centraron en la gestión de tareas repetitivas con autonomía muy limitada. La tercera generación impulsó la visión artificial, en lo cual se ha avanzado mucho en los ochenta y noventa. La cuarta incluye movilidad avanzada en exteriores e interiores y la quinta entraría en el dominio de la inteligencia artificial en lo cual se está trabajando actualmente.

1.2 Los robots bípedos

1.2.1 Tipos

Desde el punto de vista semántico de la palabra bípedo se puede definir a los robots bípedos como aquellos en los que el movimiento del robot depende del movimiento de dos extremidades mecánicas a modo de piernas. Estos robots surgen de el deseo de los humanos de construir máquinas que se asemejen a ellos y les sirvan de ayuda en sus labores cotidianas adaptándose lo más posible al entorno que hemos creado. Desde un punto de vista histórico, los robots bípedos se engloban en dos grupos: los robots pasivos y los robots activos.

- Los robots pasivos: fueron cronológicamente los primeros. Estos sistemas mecánicos tenían como característica fundamental que podían caminar sin necesidad de control ni de ningún tipo de actuadores o motores, es decir, que su movimiento era generado únicamente por la acción de la fuerza de la gravedad. Este era un modelo mecánico muy eficaz si tenemos en cuenta la relación eficiencia-energía que tenía. La principal ventaja de estos robots pasivos es que no requerían de energía externa para caminar, pero su desventaja radicaba principalmente en que su direccionalidad está limitada y era prácticamente imposible que estos robots subieran pendientes.

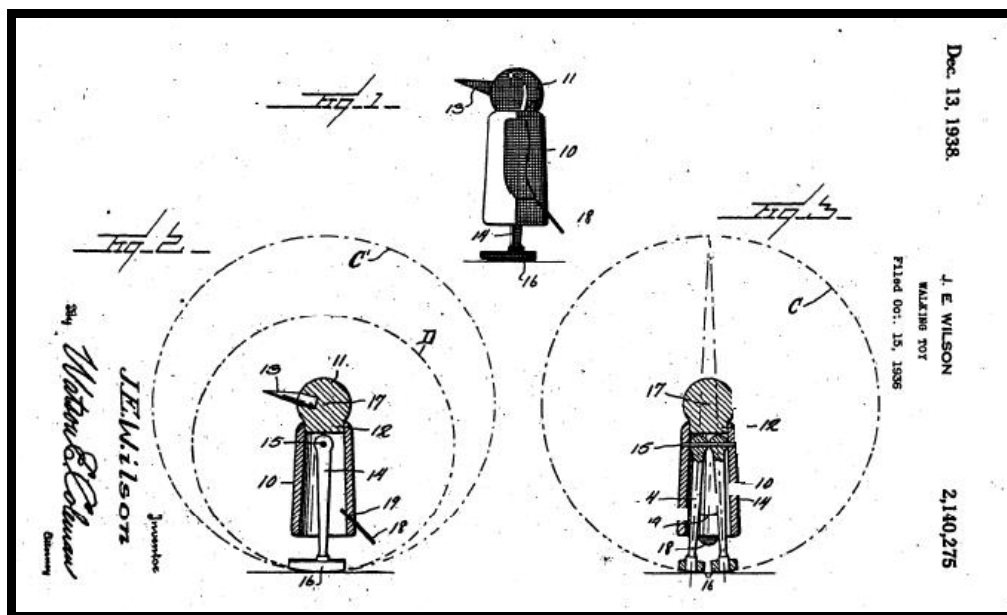


Imagen 1.2.1.1: Diseño de la patente de Wilson Walkie.

- Los robots activos: Son aquellos que sí requieren la actuación de fuerzas externas, motores, que posibiliten su movimiento. Estos robots activos han ido evolucionando desde su diseño más simple, con un único actuador, hasta robots mucho más complejos que cuentan 30 motores, con sus respectivos sistemas de control, controlados por autómatas.

Una consecuencia directa del aumento de complejidad de estos robots es que requieren para su funcionamiento un mayor número de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos. En las imágenes 1.2.1.2 y 1.2.1.3 se muestran dos robots fabricados en la Universidad Carlos III de Madrid y se detallan sus características y componentes principales.



Imagen 1.2.1.2: Robot Rh-0



Imagen 1.2.1.3: Robot Rh-1

Los robots Rh-0 y Rh-1 se diferencian casi exclusivamente en el año de fabricación: el Rh-0 (2004) y el Rh-1 (2007) y en que el Rh-1 incorpora una carcasa que el Rh-0 no incorpora.

Las características comunes son:

- Tamaño natural: 1,5 m.
- Peso: 50 kg incluidas baterías.
- Dispone de 21 grados de libertad: 6 GDL en cada pierna. 3 GDL en cada brazo. 1 GDL en la cabeza.
- 2 ordenadores a bordo.
- 2 CanBus de comunicación.
- Sensores a bordo: 2 Fuerza/Par en los brazos. 3 inclinómetros. 3 acelerómetros.
- Conexión wi-fi [22].

Esta variación en la complejidad de los robots implica directamente un incremento considerable en el peso de los mismos; y en consecuencia un aumento en la energía que éstos requieren para moverse. Igualmente, al estar dotados de un número mayor de motores y dispositivos de control electrónico, se incrementa la energía que necesita el robot para su funcionamiento. Este es un problema fundamental ya que al requerir mayor energía se reduce proporcionalmente su autonomía de movimiento, sin estar conectado a la red eléctrica. Esta es la principal limitación de estos robots. Es por esto que los trabajos de desarrollo que se están llevando a cabo estarán encaminados a simplificar los diseños de los robots y de este modo reducir su necesidad de aporte de energía.

1.2.2 Fundamentos de la marcha bípeda

El modo de caminar de los robots bípedos no es sino una aproximación lo más real posible al caminar humano. Durante el caminar de los bípedos existe una premisa fundamental que se ha de cumplir siempre y es que por lo menos uno de los dos pies mecánicos ha de estar apoyado en el suelo. Esto para los seres humanos no es del todo imprescindible ya que cuando corremos hay momentos en los que tenemos ambos pies en el aire.

Los dos mayores componentes del ciclo de la marcha son: la fase de apoyo y la fase de balanceo. Una pierna está en fase de apoyo cuando está en contacto con el suelo y en fase de balanceo cuando no contacta con el suelo. La cantidad relativa de tiempo gastado durante cada fase del ciclo de la marcha, a una velocidad normal, es [3]:

1. Fase de apoyo: 60% del ciclo
2. Fase de balanceo: 40% del ciclo
- 80% ➡ Apoyo simple o monopodal
- 20% ➡ Doble apoyo

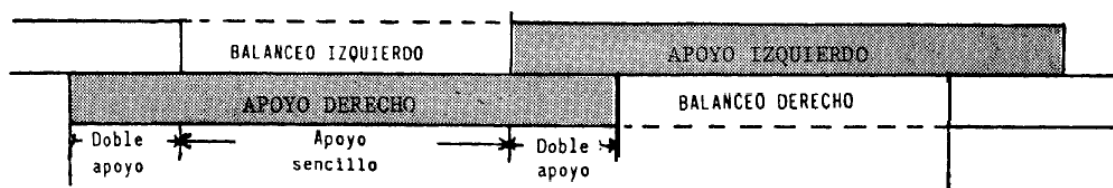


Imagen 1.2.2.1 Ciclo de la marcha

Con el aumento de la velocidad de la marcha hay un aumento relativo en el tiempo gastado en la fase de balanceo, y con la disminución de la velocidad una relativa disminución. La duración del doble apoyo disminuye cuando se aumenta la velocidad de la marcha. A continuación se ilustran unas imágenes del robot PASIBOT en distintos momentos de su ciclo de marcha para que el lector asocie lo explicado en el párrafo anterior:

- La caminata comienza con los dos pies extendidos y sobre el suelo. Al estar ambos pies apoyados el equilibrio del robot en este instante es perfecto por lo que el equilibrio no es significativo. Esta fase es la que se ha nombrado como doble apoyo. En la imagen 1.2.2.2 se observa al robot PASIBOT en fase de doble apoyo.

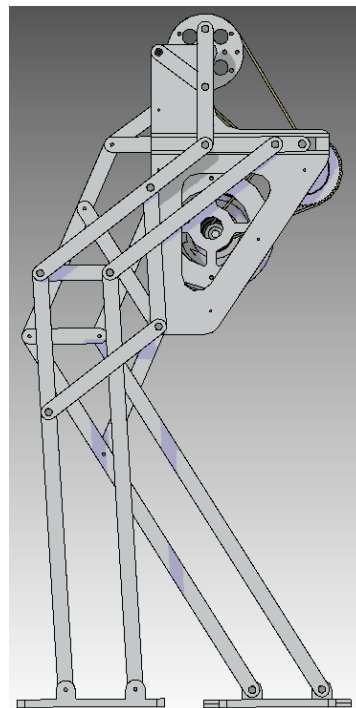


Imagen 1.2.2.2: Doble apoyo

- El gran problema comienza al levantar uno de los pies para realizar el avance ya que la tendencia es caer hacia ese lado y hacia delante o hacia atrás, dependiendo del estado dinámico del robot en ese instante. Esta fase, ilustrada en la imagen 1.2.2.3, se conoce como apoyo monopodal o simple del pie que está en contacto con el suelo y fase de balanceo del otro.

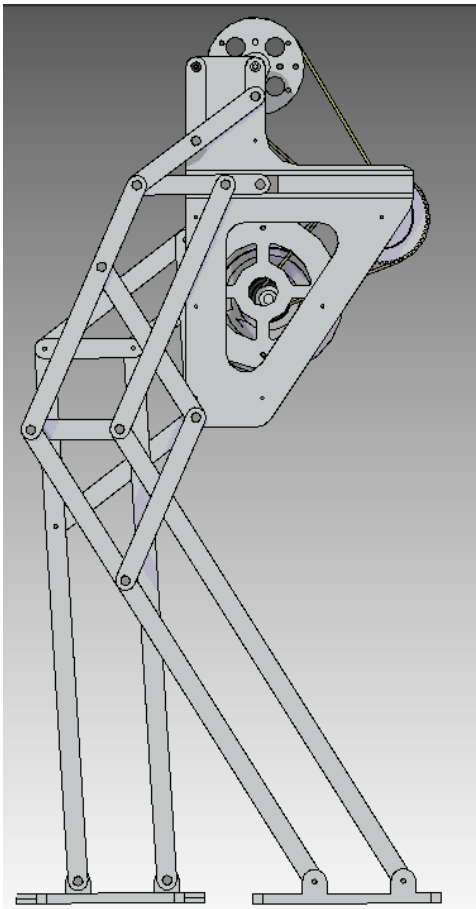


Imagen 1.2.2.4: Doble apoyo

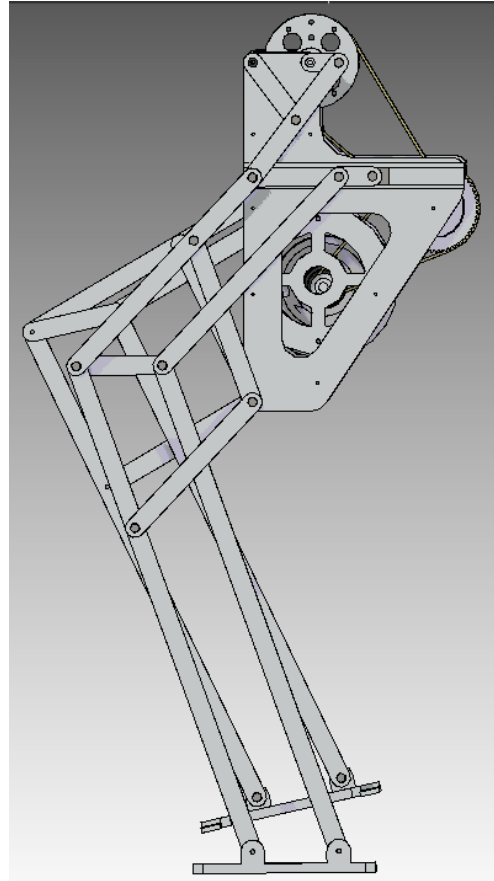


Imagen 1.2.2.3: Balanceo

- El medio ciclo se completa cuando los dos pies vuelven a estar en el suelo y nos encontramos de nuevo en fase de doble apoyo, imagen 1.2.2.4.

El otro medio ciclo es idéntico, solamente que el pie que se levanta es el que anteriormente servía de apoyo y viceversa.

Capítulo II: El robot PASIBOT



2.1 Descripción del robot PASIBOT

El presente Proyecto de Fin de Carrera esta centrado en el robot bípedo PASIBOT propiedad de la Universidad Carlos III, donde fue ideado y fabricado. El robot **PASIBOT se engloba dentro de los robots activos**, atendiendo a la clasificación hecha anteriormente. En este robot se aúnan dos características que parecen contradictorias: simplicidad y complejidad. Esto, que resulta un tanto inverosímil, no lo es tanto si se explica que cuenta con **un único grado de libertad**, es decir, que un único movimiento rotativo suministrado por un motor eléctrico hace posible, a través de mecanismos y de distintos sistemas de transmisión, el funcionamiento de todo el conjunto mecánico. Este fue el principal reto que afrontaron sus creadores, que algo tan simple como un motor eléctrico haga posible el funcionamiento de un bípedo.

El robot PASIBOT es un conjunto mecánico formado por 38 piezas distintas, 213 en total. En la tabla 2.1.1 se muestra el nombre que se le han dado a cada una de estas piezas, así como el número de ellas que se encuentran dentro del robot. La nomenclatura que se muestra ha continuación se ha respetado a lo largo del presente proyecto. El ANEXO I, incluido en el presente proyecto, contiene los planos detallados de cada una de estas 38 piezas así como un explosionado del conjunto.



Imagen 2.1.1: PASIBOT

Nombre	Número	Nombre	Número
MOTOR	1	PERONE	2
ENGRANAJE GRANDE	1	RODAMIENTOS	34
ENGRANAJE MEDIANO	1	TIBIA	2
ENGRANAJE PEQUEÑO	1	RODILLA	1
ENGRANAJE CON AGUJEROS	1	CONTRAFÉMUR	2
EJE GRANDE	1	TENDÓN INFERIOR	2
ROSCA MOTOR	8	SEPARADOR	4
ROSCA BASE MOTOR	8	FÉMUR	2
TUBOS CADERA	4	TENDÓN SUPERIOR	1
DESLIZADERA	2	ESTABILIZADOR	1
ENGANCHE MOTOR	1	BIELA	2
TUBOS ROSCADOS	4	BALANCÍN	1
CADERA EXT. IZQUIERDA	1	MANIVELA	1
CADERA INT. IZQUIERDA	1	PIE	2
CADERA EXT. DERECHA	1	ARANDELA	18
CADERA INT. DERECHA	1	TORNILLO_16	6
CORREA	2	TORNILLO_21	8
CORREDERA	1	TORNILLO_27	4
RODAMIENTO EJE PRINCIPAL	18	TORNILLO_38	4

Tabla 2.1.1: Nomenclatura piezas PASIBOT

Las propiedades físicas y las especificaciones técnicas de cada uno de estos elementos se han detallado más adelante dentro del capítulo titulado *El modelo fabricado*.

2.1.1 CHEBYSHEV

Pafnuty Lvovich Chebyshev nació el 16 de Mayo de 1821 en Okatovo, región de Kaluga, al oeste de Rusia. Chebyshev es uno de los célebres matemáticos del siglo XIX, creador de varias escuelas matemáticas en Rusia: teoría de los números, teoría de probabilidades, teoría de aproximación de funciones, teoría de mecanismos y máquinas, etc. Es autor de más de 80 publicaciones. Murió el 8 de Diciembre de 1894 en San Petersburgo, Rusia[4].

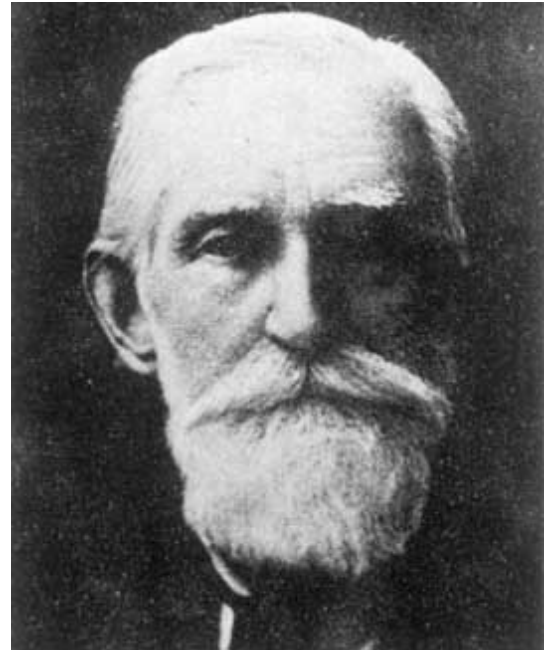


Imagen 2.1.1.1 : CHEBYSHEV

El mecanismo de CHEBYSHEV consiste básicamente en un **mecanismo biela-manivela**. Con este mecanismo conseguimos convertir el movimiento circular que nos aporta el motor en un movimiento recto, la mitad del ciclo, y elíptico la otra mitad. El movimiento recto del punto de referencia corresponderá con el período durante el cual el pie este totalmente apoyado, mientras que el otro pie se encontrará en el periodo de movimiento elíptico. **El movimiento elíptico del pie que se encuentre en el aire lo desplazará hacia delante hasta que se encuentre totalmente apoyado, momento en cual comenzará a soportar todo el peso del robot y comenzará el periodo de movimiento rectilíneo de su punto de referencia y, en consecuencia, el periodo de movimiento elíptico del otro pie.**



Imagen 2.1.1.2: Mecanismo creado por CHEBYSHEV

Manivela: Movimiento circular, se encuentra conectada al motor.

Balancín. Su extremo libre es en realidad un punto fijo.

Biela: En su extremo libre es donde se realiza el movimiento, rectilíneo en una parte del ciclo y elíptico en la otra.

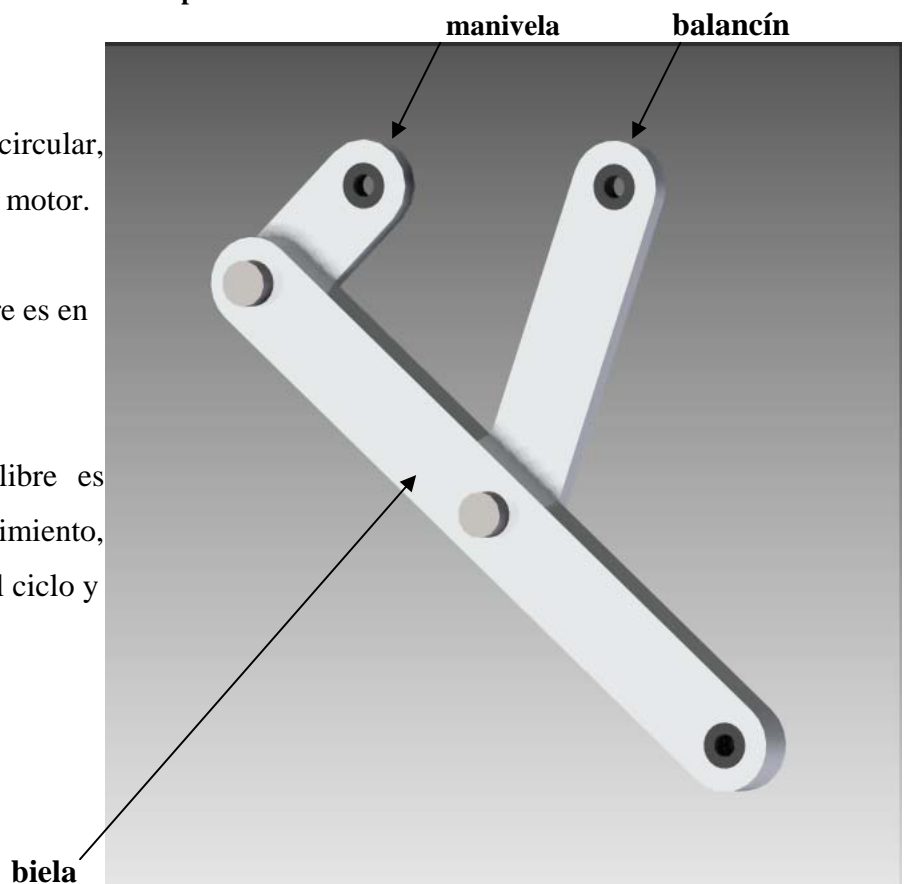


Imagen 2.1.1.3: Mecanismo instalado en el robot

2.1.2 Extensión

Esta segunda parte del movimiento del PASIBOT está basada en otro mecanismo, el pantógrafo. **Un pantógrafo es un mecanismo articulado basado en las propiedades de los paralelogramos**; este instrumento dispone de unas varillas conectadas de tal manera que se pueden mover respecto de un punto fijo (pivote)[5]. El pantógrafo, como instrumento de dibujo, permite copiar una figura o reproducirla a una escala distinta. Pues bien, gracias a este mecanismo, **lo que conseguimos es aumentar e invertir el movimiento que se ha generado gracias al mecanismo de CHEBYSHEV.**

Punto de referencia

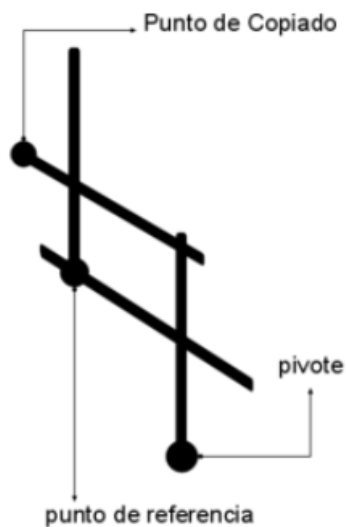


Imagen 2.1.2.1: Pantógrafo de dibujo



Imagen 2.1.2.2: Pantógrafo del PASIBOT

2.1.3 Estabilización

Para la función estabilizadora del PASIBOT se emplea de nuevo un mecanismo articulado que se ha denominado **mecanismo de estabilización**. Este mecanismo está formado por **cuatro eslabones** (peroné, contrafémur, rodilla y estabilizador) **que aportan solidez al mecanismo global y obligan al pie a mantener una posición horizontal durante su fase de apoyo**. Esto es debido a que un extremo del estabilizador discurre por una corredera alineada con el tramo recto del extremo de la biela del mecanismo de CHEBYSHEV. Por ello, estabilizador, rodilla y pie permanecen paralelos a la deslizadera en fase de apoyo (ver imagen 2.1.3.1).

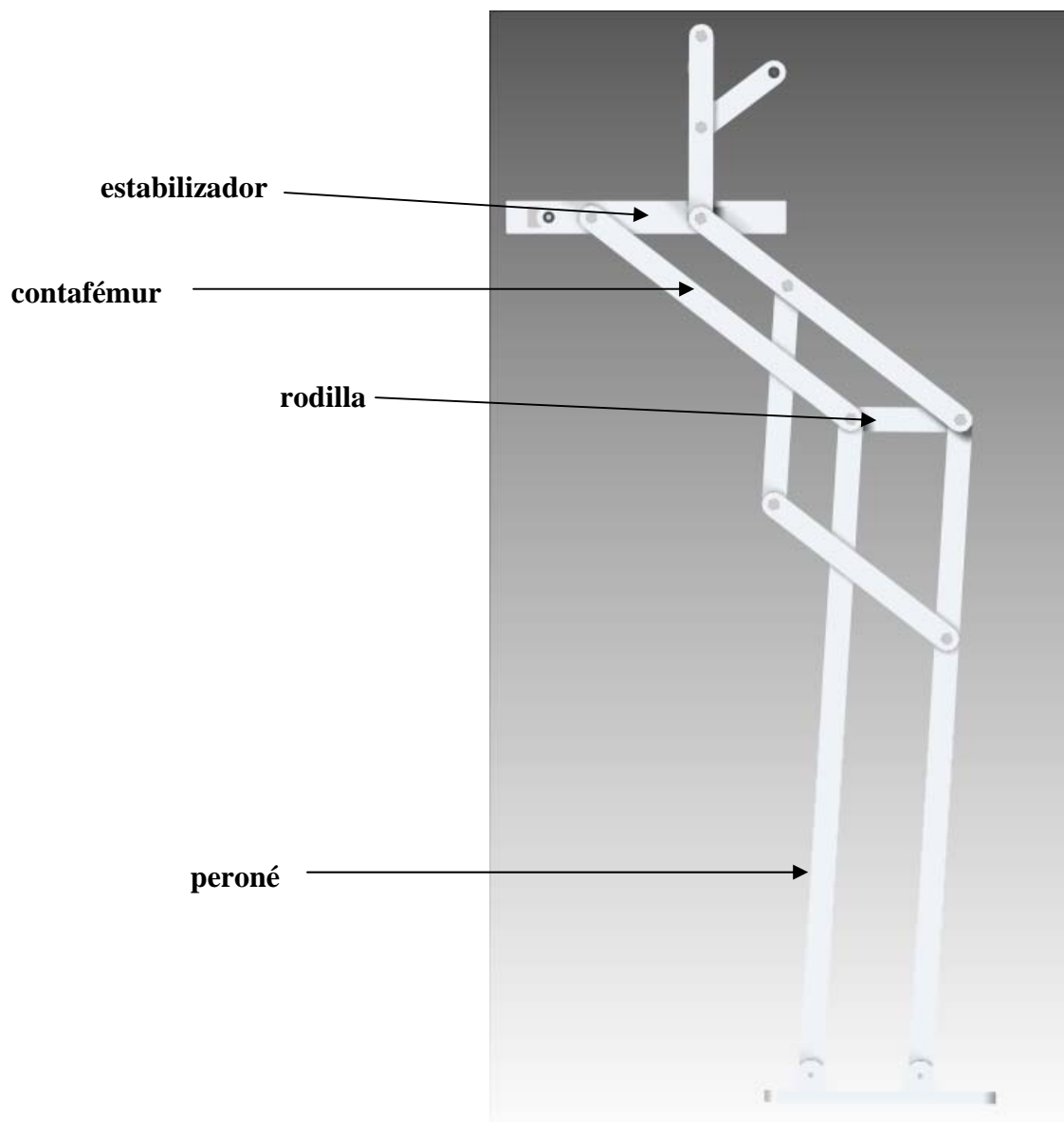


Imagen 2.1.3.1: CHEVYSHEV + pantógrafo + estabilizador

2.1.4 Sistema de transmisión

El movimiento del PASIBOT lo genera un pequeño motor eléctrico con unas especificaciones técnicas que serán descritas más adelante. **Para conseguir sobre la manivela el par adecuado fue necesario diseñar una reducción en dos etapas, mediante un par de correas y tres ruedas dentadas.** En la imagen 2.1.4.1 se ilustra este sistema de transmisión síncrono ubicado en el interior de la cadera del robot.

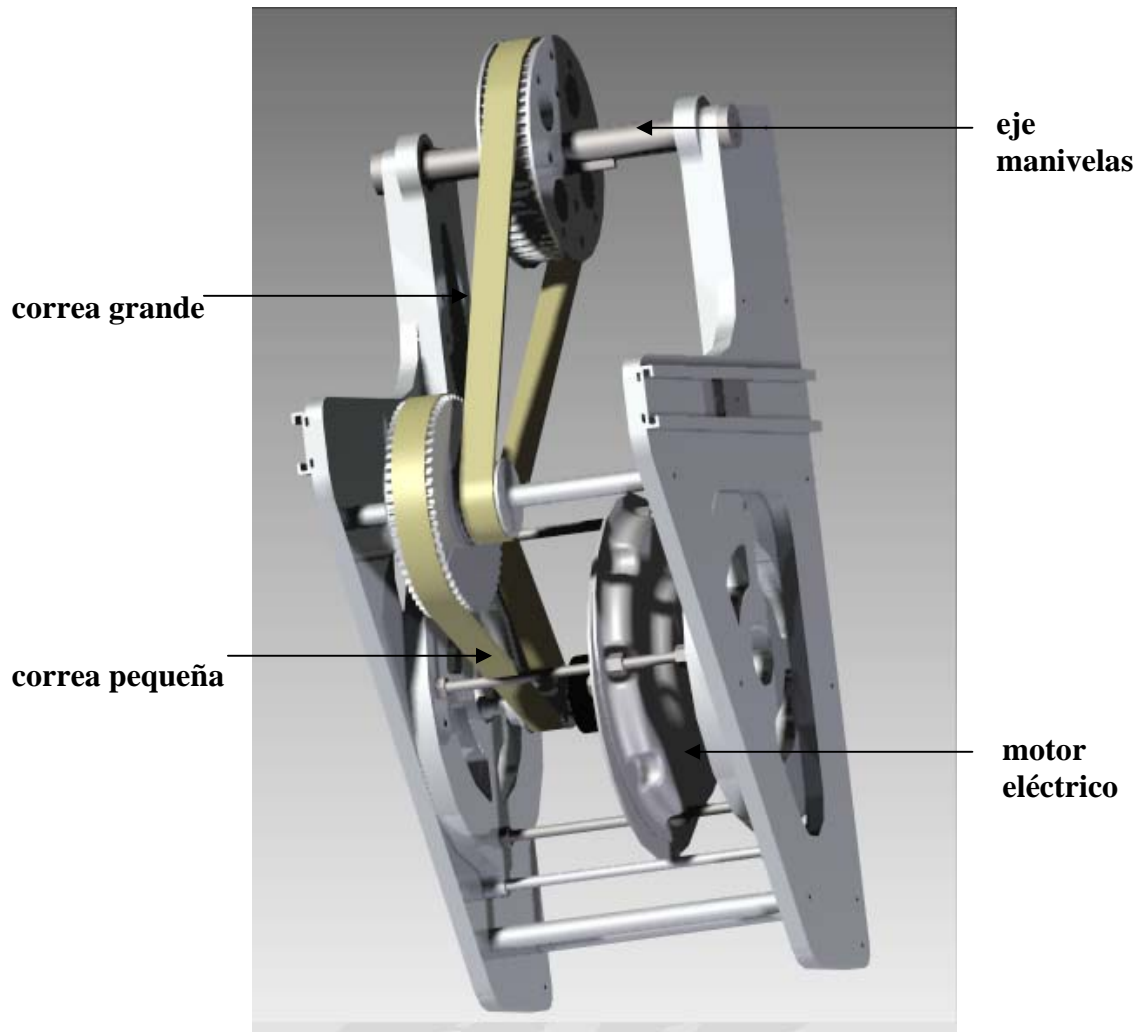


Imagen 2.1.4.1: Cadera PASIBOT

2.1.5 El modelo fabricado

Del robot PASIBOT, cuyo funcionamiento ha sido explicado teóricamente en los capítulos anteriores, se ha construido un prototipo real. Hace unos meses, la Universidad Carlos III puso en marcha el proyecto PASIBOT y ya existe en la actualidad un modelo real fabricado según el diseño descrito con anterioridad. Como ocurre siempre que se trabaja en el desarrollo de un proyecto tecnológico o de investigación, no se obtiene el objetivo deseado al primer intento, por lo que el primer PASIBOT resultó ser imperfecto. En este capítulo se procederá a detallar las piezas que fueron colocadas en PASIBOT, con el fin de averiguar cuáles han podido ser los errores cometidos y, más adelante poder proponer algunas mejoras para posteriores modelos de PASIBOT.

Todas las piezas de PASIBOT a excepción del motor, los rodamientos, las correas y los tornillos, fueron fabricadas en aluminio. La elección de este material se debe a las excelentes propiedades mecánicas que posee teniendo en cuenta su baja densidad. En la tabla 2.1.5.1 se muestran las propiedades mecánicas del aluminio. Conocer estas propiedades es fundamental para entender cómo se comporta el material bajo determinadas sollicitaciones, así como para las simulaciones de las que se hablará más adelante.

Nombre de propiedad	Valor
Densidad	2712,000 kg/m ³
Coefficiente de expansión t...	0,0000 /C
Conductividad térmica	0,221 kW/m-C
Calor específico	920,000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	68947570,000 kPa
Coefficiente de Poisson	0,330
Límite elástico	27579,028 kPa
Tensión de rotura	68947,570 kPa
Elongación %	0,000

Tabla 2.1.5.1:Propiedades Aluminio

Modelado y simulación del robot PASIBOT. Estudio de la rigidez y mejora en la prevención del vuelco lateral.

Para las uniones entre elementos con movimiento relativo fueron colocados rodamientos rígidos de bolas de acero inoxidable de la marca comercial SKF. Estos rodamientos rígidos de una hilera de bolas tienen las mismas ranuras profundas en los caminos de rodadura y la misma alta osculación entre los caminos de rodadura y las bolas que los rodamientos rígidos de bolas estándar fabricados de acero cromado al carbono. No llevan escotes de llenado y pueden soportar cargas axiales en ambos sentidos además de cargas radiales, incluso a altas velocidades. En la tabla 2.1.5.2 que sigue, se muestran los valores fundamentales del rodamiento seleccionado acorde con las necesidades y condiciones de funcionamiento del PASIBOT [6].

Dimensiones principales			Capacidades de carga		Carga límite de fatiga P_u	Velocidades		Masa	Designación
d	D	B	C	C_0		Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	rpm		kg	-
1	3	1	0,056	0,017	0,00075	240000	150000	0,00036	W 618/1
2	5	1,5	0,156	0,048	0,002	190000	120000	0,00015	W 618/2
2,5	8	2,8	0,27	0,102	0,0045	150000	95000	0,0007	W 60/2,5
3	6	3	0,216	0,085	0,0036	160000	100000	0,00035	W 637/3
3	10	4	0,39	0,129	0,0056	130000	80000	0,0016	W 623
3,175	7,937	2,779	0,39	0,129	0,0056	150000	95000	0,0007	WEEEX 002
4	9	2,5	0,449	0,173	0,0075	140000	85000	0,0007	W 618/4
4	11	4	0,605	0,224	0,0098	130000	80000	0,0019	W 619/4
4	12	4	0,676	0,27	0,012	120000	75000	0,0024	W 604
4	13	5	0,793	0,28	0,012	110000	67000	0,0031	W 624
4,762	12,7	3,967	0,793	0,28	0,012	110000	67000	0,0021	WEEY 003
5	11	3	0,54	0,245	0,011	120000	75000	0,0012	W 618/5
5	13	4	0,741	0,325	0,014	110000	67000	0,0023	W 619/5
5	16	5	0,923	0,365	0,016	95000	60000	0,005	W 625
5	19	6	1,86	0,915	0,04	80000	50000	0,0090	W 635
6	13	3,5	0,741	0,335	0,015	110000	67000	0,0020	W 618/6
6	15	5	1,04	0,455	0,02	100000	63000	0,0039	W 619/6
6	19	6	1,86	0,915	0,04	80000	50000	0,0084	W 626
6,35	15,875	4,978	1,04	0,455	0,02	100000	63000	0,004	WEEY 004
7	14	3,5	0,806	0,39	0,017	100000	63000	0,0022	W 618/7
7	17	5	1,24	0,54	0,024	90000	56000	0,0049	W 619/7
7	19	6	1,86	0,915	0,04	85000	53000	0,0075	W 607
7	22	7	2,76	1,32	0,057	70000	45000	0,013	W 627
8	16	4	1,12	0,55	0,024	90000	56000	0,0030	W 618/8
8	19	6	1,59	0,71	0,031	80000	50000	0,0071	W 619/8

Tabla 2.1.5.2: Especificaciones de los rodamientos SKF

El movimiento del sistema entero depende de un pequeño motor eléctrico de la marca PML cuyas especificaciones técnicas se muestran en la página siguiente[7]. Se ha remarcado el modelo exacto que está montado en PASIBOT.



GP Series

PERFORMANCE DATA

TEST DETAIL			GPM SERIES MOTOR TEST RESULTS						GPN SERIES MOTOR TEST RESULTS					
MOTOR RATINGS	SYMBOL	UNIT	GPM9	GPM9LR	GPM12	GPM12LR	GPM16	GPM16LR	GPN9	GPN9LR	GPN12	GPN12LR	GPN16	GPN16LR
Power	P	Watt	41	38.7	110	64	300	221	94	75	200	190	533	324
Torque	T	Ncm	13.1	10	35	20	96	73	30	25	64	48	170	100
Speed	N	rpm	3000	3705	3000	3050	3000	2905	3000	2887	3000	3810	3000	3102
Voltage	V	Volt	14.5	9	23.5	12	43.3	24	22.5	12	37.5	24	75.8	36
Current	I	Amp	6.9	11.7	7.6	10.8	9.3	13.4	6.85	11.4	7.3	11	8.4	11.7
Continuous Stall Current	IS	Amp	4.5	6.5	5.0	6.5	6.0	8.0	4.5	6.5	5.0	7.0	5.7	8.0

MOTOR CONSTANTS	SYMBOL	UNIT	GPM9	GPM9LR	GPM12	GPM12LR	GPM16	GPM16LR	GPN9	GPN9LR	GPN12	GPN12LR	GPN16	GPN16LR
Torque	Kt	Ncm/Amp	2.19	1.05	5.1	2.2	11.2	6.0	4.77	2.38	9.65	4.8	21.87	9.6
EMF	Ke	V/krpm	2.3	1.1	5.3	2.3	11.8	6.3	5.0	2.5	10.1	5.0	22.9	10
Damping	Kd	Ncm/krpm	0.3	0.3	0.59	0.56	0.99	1.0	0.5	0.3	1.2	0.7	2.5	2.5
Friction Torque	Tf	Ncm	1.2	1.2	2.0	2.0	4.9	4.9	1.2	1.2	2.0	2.0	4.9	4.9
Terminal Resistance @5A	Rm	Ohms	1.1	0.42	1.0	0.45	0.85	0.425	1.1	0.42	1.0	0.45	0.85	0.425
Total Inertia	J	kg.cm ²	0.388	0.388	1.624	1.624	6.284	6.284	0.388	0.388	1.624	1.624	6.284	6.284

PERFORMANCE CHARACTERISTICS AND DATA

For more information visit our website www.pmlflightlink.com. Precise figures will be qualified upon receipt of customer's specific application requirements.

DIMENSION GUIDES

* All variations
All dimensions in mm. All weights in kg.

MOTOR TYPE	A	B	C	D	E	F	G	H	Wt
GP*9*	120	5.992/5.987	30.2	11.7	4.7	110	26	19.05	0.59
GP*12*	152.4	9.995/9.982	53	28.5	5.8	142	32	34.3	1.22
GP*16*	215.1	11.988/11.976	60	32.5	7.1	200	35.6	45.72	2.9

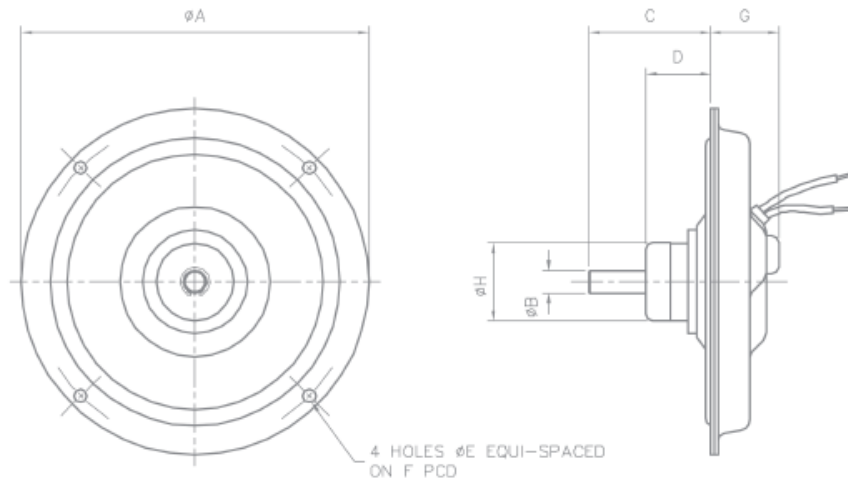


Imagen 2.1.5.1: Características técnicas del motor

2.2 Planteamiento del problema

Como se ha comentado en el capítulo anterior, el robot PASIBOT no tiene el funcionamiento deseado y para el que fue diseñado, caminar, ya que aparece el fenómeno del “*vuelco lateral*”. PASIBOT, cuando levanta uno de sus pies para caminar, vuelca hacia ese lado. ¿A qué es debido este fenómeno?. Pues bien, esto se explica porque la proyección sobre el suelo del c.d.m. del robot no cae sobre el pie de apoyo, originando lo que podemos denominar un par de vuelco que lo hace caer hacia ese lado. Los pies de PASIBOT fueron diseñados para que la proyección del c.d.m. cayese siempre sobre el pie de apoyo, por lo que teóricamente no debería volcar. En las imágenes 2.3.1 y 2.3.2 se ilustra esta situación teórica, con el pie derecho apoyado y el pie izquierdo en el aire.

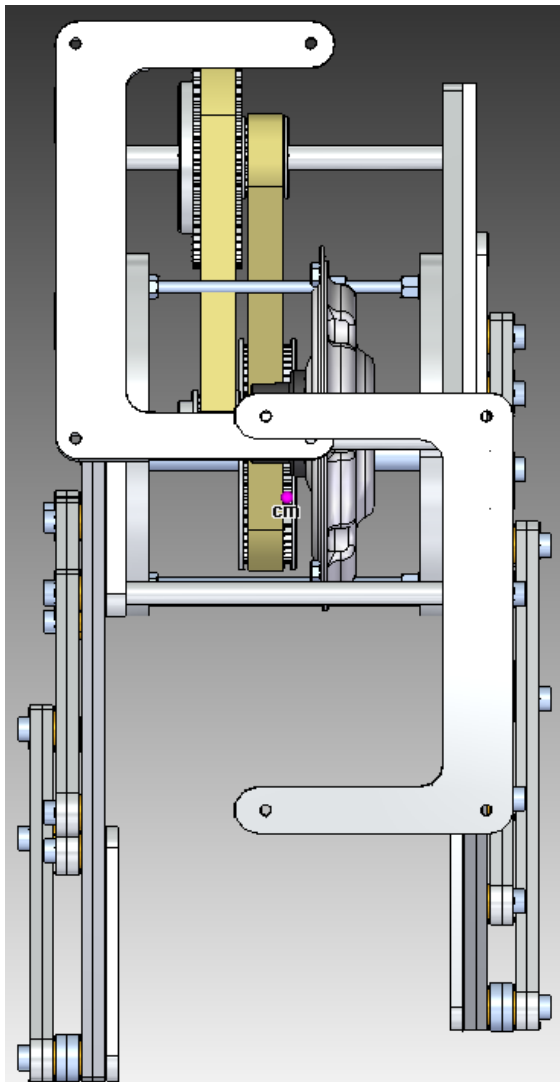


Imagen 2.3.1: Vista inferior

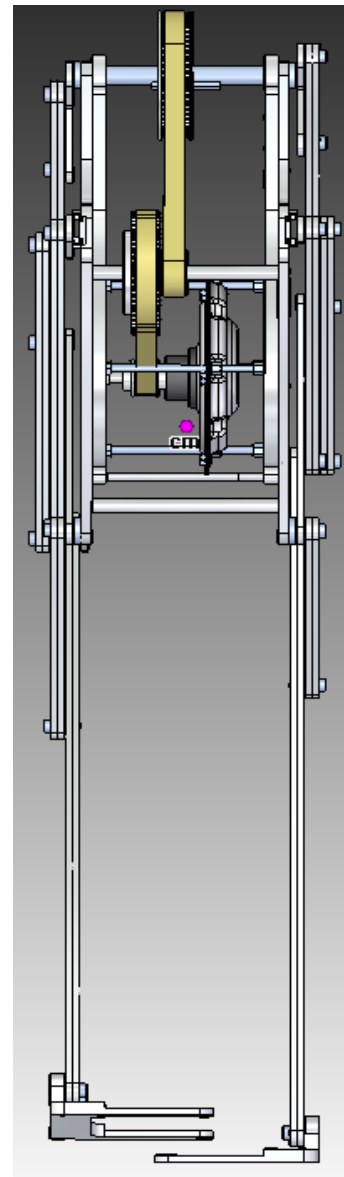


Imagen 2.3.2: Alzado

En las imágenes 2.3.3 y 2.3.4 se muestra la posición real que toma el c.d.m. respecto del pie de apoyo, cuando el otro pie está en el aire, y que es la causa del vuelco.

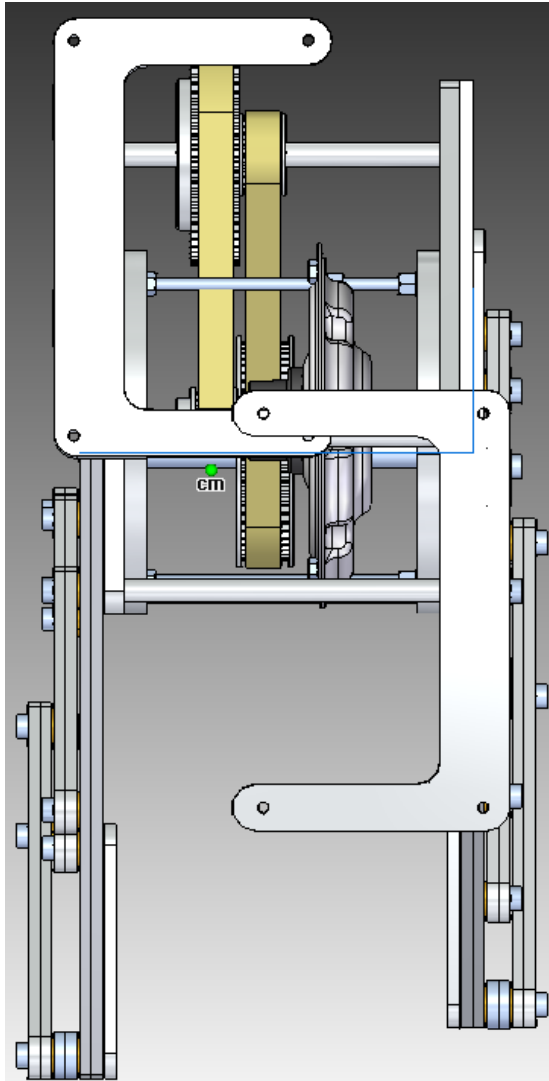


Imagen 2.3.3: Vista inferior

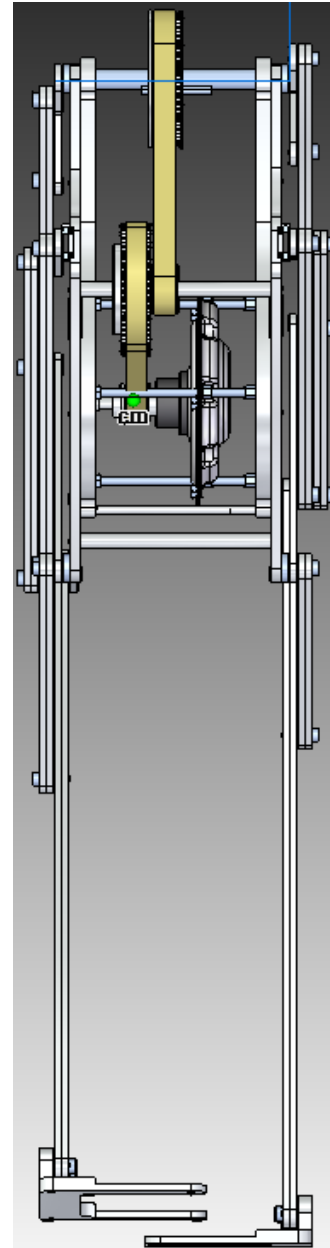


Imagen 2.3.4: Alzado

¿Por qué se produce esta situación? ¿Por qué el c.d.m del robot se sale de su posición de equilibrio en la planta del pie cuando fue diseñado específicamente para que esto no ocurriese? Pues bien, existen dos respuestas válidas para estos interrogantes.

La primera es que cuando el robot PASIBOT fue diseñado se pasó por alto la influencia que tendría sobre la dinámica del conjunto la elasticidad de los materiales de los que estaba fabricado el robot. Teóricamente, considerando a PASIBOT como sólido rígido, su comportamiento sería el que se ilustra en las imágenes 2.3.1 y 2.3.2. Sin embargo, teniendo en cuenta la elasticidad de los materiales que lo componen, el comportamiento del robot se aproximará al que se muestra en las imágenes 2.3.3 y 2.3.4 ya que se producirá una flexión en los eslabones, especialmente el fémur y la tibia, que provocará que la proyección del c.d.m. se desplace de su posición de equilibrio y se salga de su zona de estabilidad.

El segundo factor que explica este comportamiento inestable del robot, serían las imperfecciones en el proceso de fabricación y de montaje. El robot PASIBOT está compuesto por un total de 213 piezas unidas entre sí por elementos de sujeción como tornillos y elementos rodantes, rodamientos. Estas uniones se suponen perfectas durante la etapa de diseño, pero la realidad es muy distinta. Cuando se realiza la unión entre dos piezas pueden aparecer pequeñas holguras entre las piezas a unir, debidas a la imprecisión del proceso de montaje. Estas holguras causan un desalineamiento angular entre los ejes de las piezas a unir. Más adelante se observará como este desalineamiento provoca un desplazamiento indeseado del c.d.m. y, en consecuencia, una inestabilidad en el conjunto.

Capítulo III: Desarrollo del proyecto



3.1 Descripción de las herramientas empleadas

Cada una de las dos partes que componen el presente proyecto se ha desarrollado gracias a la utilización de un programa informático.

Para el modelado de PASIBOT se utilizó el programa de diseño **SOLID EDGE ST with SYNCHRONOUS TECHNOLOGY** (tecnología síncrona), una versión evolucionada del SOLID EDGE. Este nuevo programa ha supuesto una gran evolución del software, utilizando una nueva tecnología que entiende la geometría, que permite modificar dinámicamente un sólido importado sin el engorroso proceso de modificar los bocetos de las operaciones que lo han generado. Ésta es una respuesta de SIEMENS a uno de los mayores deseos de los diseñadores: poder editar, modificar y personalizar cualquier diseño de CAD con su software, independientemente de quien lo creó, cómo se creó y sobre todo, de con qué sistema CAD fue creado ese diseño. Esto convierte a esta herramienta en una de las mas potentes del mercado a todos los niveles y con una especial característica: al comprender la geometría puede editar y modificar directamente los modelos que provienen de otros programas de CAD.

SOLID EDGE ST permite editar modelos 3D tan complejos como el que se muestra en la imagen 3.1.1 sin necesidad de conocer con qué operaciones fue creado o cual era su árbol, simplemente se localiza la geometría que se desea modificar y se estira con el “controlador de volante” o simplemente se coloca una cota 3D donde se necesite, para conseguir los cambios más precisos [8]

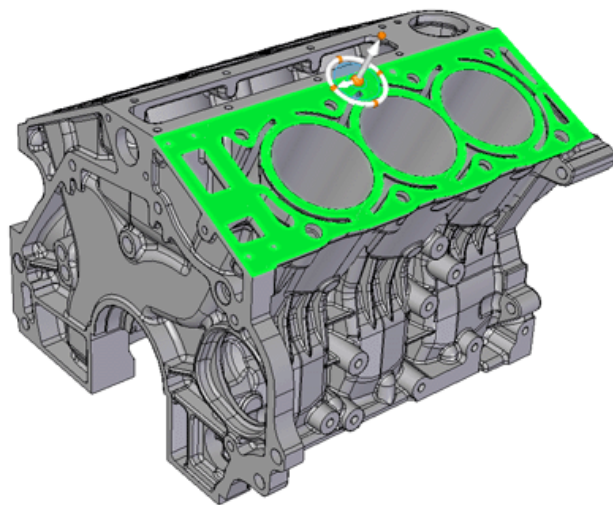


Imagen 3.1.1: Ejemplo de modelo 3D

Ventajas en cifras:

En la siguiente tabla se pueden observar algunos ejemplos comparativos de la mejora lograda en tiempos de edición y tamaños de archivo comparando tecnología tradicional con tecnología síncrona.

	Tradicional	Synchronous Technology	Mejora
Cambiar radio	85 segundos	1	x85
Mover refuerzo	15 segundos	< 1 segundo	> x15
Tamaño archivo	8 mb	2.1 mb	un cuarto del tamaño

Tabla 3.1.1: Ventajas de la tecnología síncrona

Para la etapa de análisis se ha empleado **FEMAP**, un software de análisis de elementos finitos. FEMAP está reconocido mundialmente como el primer pre y post-procesador basado en Windows para análisis de elementos finitos de ingeniería avanzada. FEMAP ofrece innovadores soluciones de análisis estáticos, dinámicos, térmicos... y proporciona soluciones a complejos problemas de ingeniería [9]. Cabe destacar la sincronización existente entre este programa y el programa de modelado, siendo muy sencillo importar geometrías desde SOLID EDGE ST a FEMAP. El programa de análisis reconoce automáticamente todas las relaciones de unión creadas entre las distintas piezas; así como las propiedades físicas y geométricas que definen a los sólidos.

3.2 Modelado

Para realizar esta primera etapa del proyecto se ha empleado el software de diseño que ha sido descrito en el apartado anterior, SOLID EDGE ST. Previamente fue necesario familiarizarse con este programa, para más tarde reproducir fielmente el modelo que ya había sido fabricado bajo los fundamentos teóricos descritos. Este modelado nos permitirá un posterior análisis del robot gracias a un software de análisis, FEMAP, descrito igualmente en el apartado anterior.

El modelado de un conjunto mecánico como PASIBOT se realiza por partes, es decir, se modela cada pieza por separado y luego es colocada dentro de un conjunto de piezas. A continuación se explica la secuencia de operaciones típicas para modelar piezas en SOLID EDGE ST. El presente proyecto no se centra en crear un tutorial del programa, por lo que no se describen todas las operaciones utilizadas en el modelado, tan sólo las más comunes. Mediante el uso de estos comandos han sido modeladas más del 95% de las piezas, por lo que resulta conveniente su explicación. A continuación se citan estos comandos y se ilustran varias imágenes de SOLID EDGE para facilitar la comprensión de los mismos.

- Elegir la entrada *pieza ISO Sincrónica* en la ventana de inicio del programa.

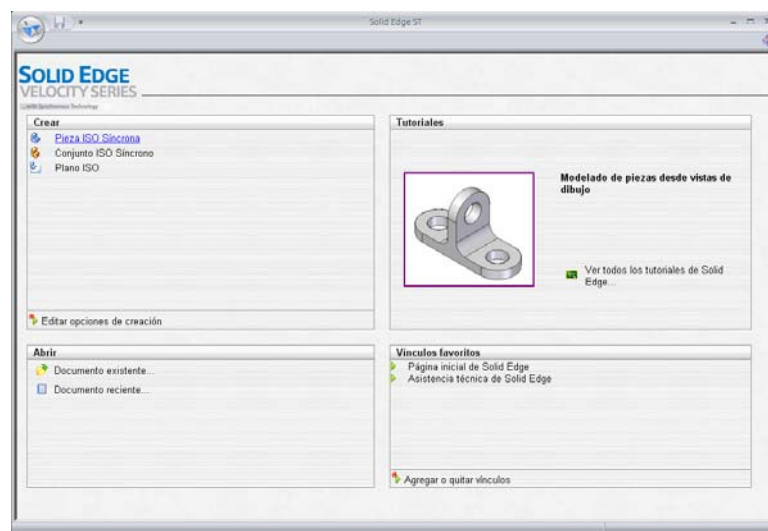


Imagen 3.2.1: ventana de inicio SOLID EDGE ST

- Especificar el plano de dibujo

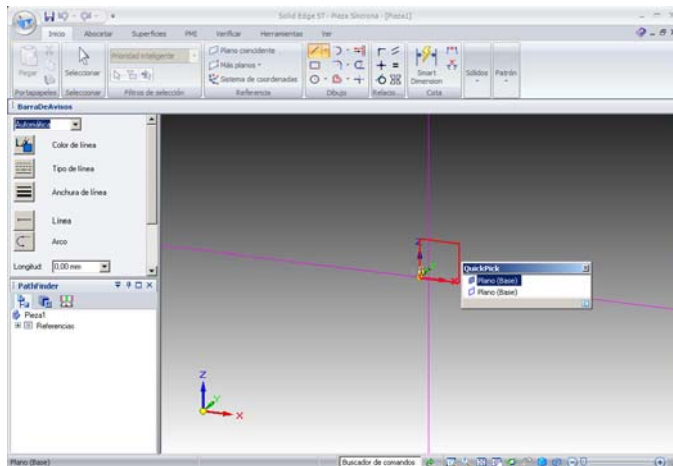


Imagen 3.2.2: Elección de plano

- Utilizando los comandos de dibujo de la barra de herramientas, dibujar el boceto deseado.

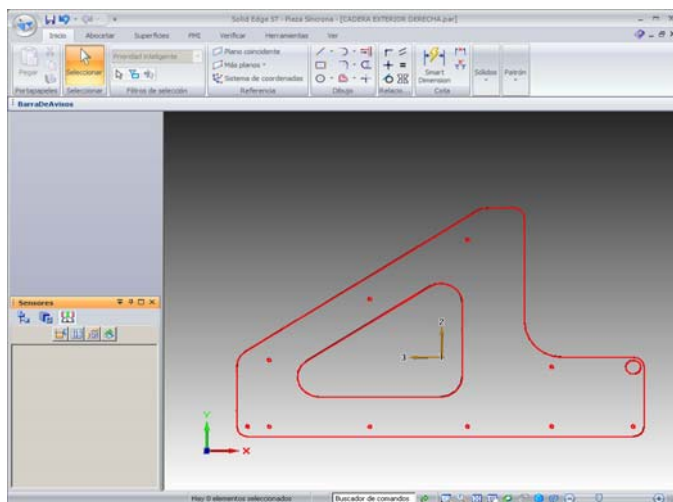


Imagen 3.2.3: Boceto “cadera exterior”

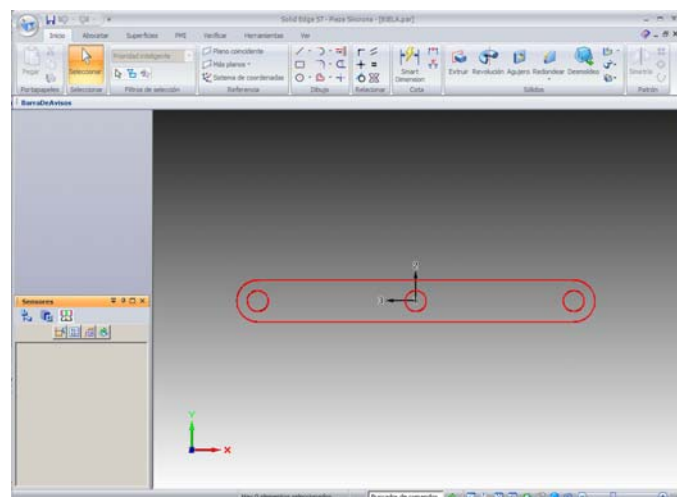


Imagen 3.2.4: Boceto “biela”

Modelado y simulación del robot PASIBOT. Estudio de la rigidez y mejora en la prevención del vuelco lateral.

- Extrusión de la región abocetada.

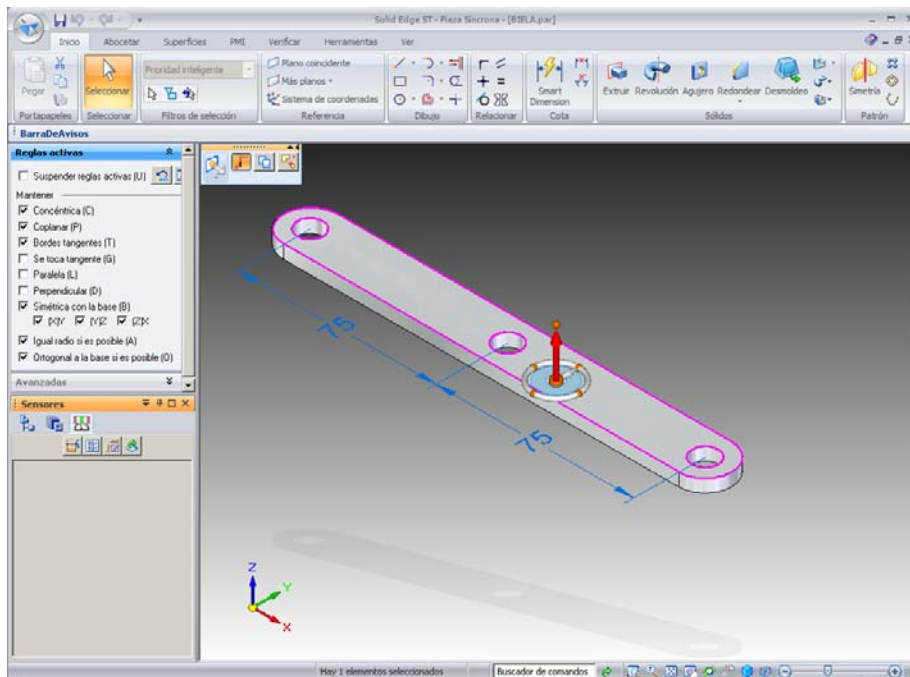


Imagen 3.2.5: Extrusión boceto “biela”

Una vez que tenemos la pieza, podemos trabajar sobre ella, por ejemplo, haciendo unos agujeros roscados:

- Activar el comando agujero.

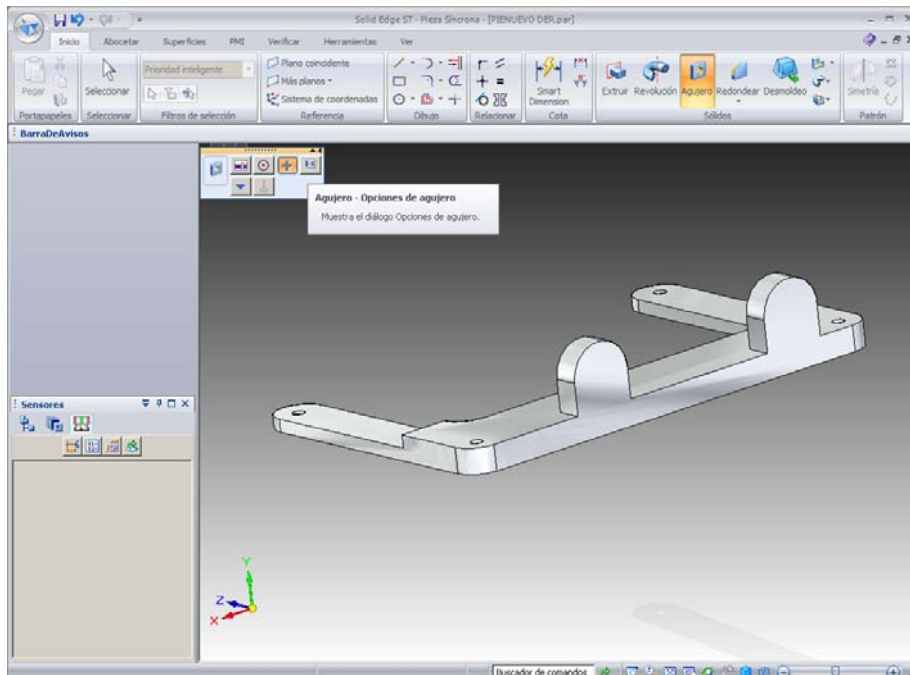


Imagen 3.2.6: Selección del comando “agujero”

- Elegir el tipo de agujero que queremos hacer

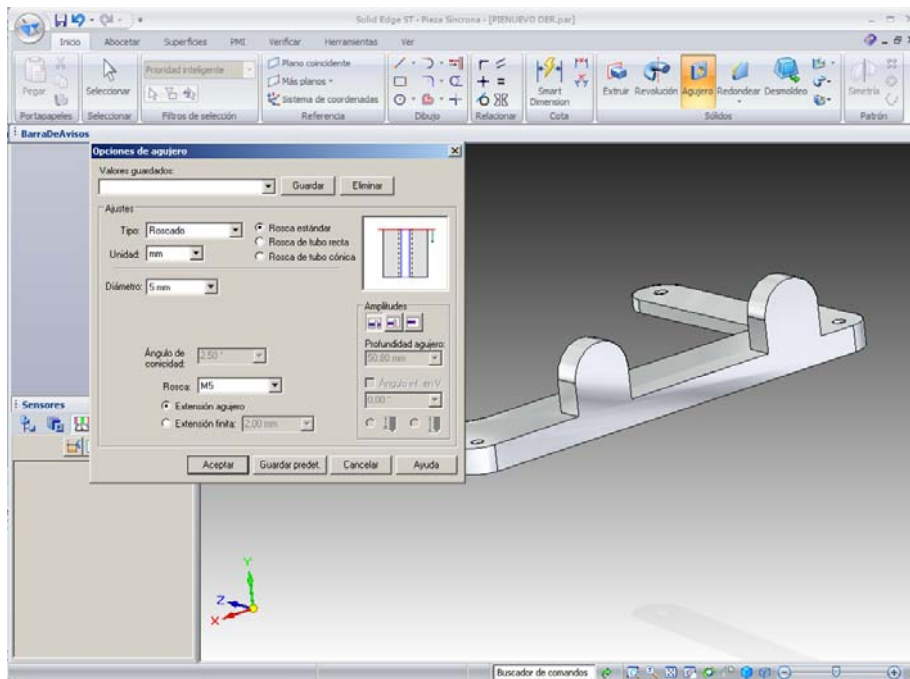


Imagen 3.2.7: Opciones de agujero

La otra operación fundamental en los sólidos, aparte de los agujeros, fue el vaciado. Esta operación está incluida dentro del comando extrusión. Para hacer el vaciado se debe dibujar el boceto sobre la superficie de la pieza y realizar la operación de extrusión hacia la pieza para vaciar la región abocetada.

- Dibujar el boceto de la región del vaciado

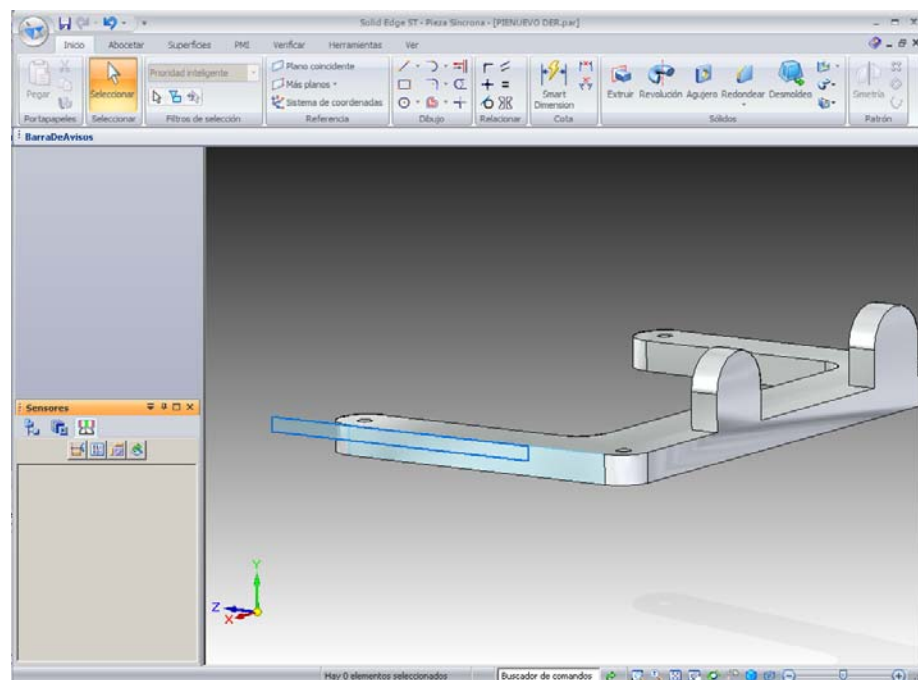


Imagen 3.2.8: Boceto de vaciado

Modelado y simulación del robot PASIBOT. Estudio de la rigidez y mejora en la prevención del vuelco lateral.

- Vaciado de la región abocetada

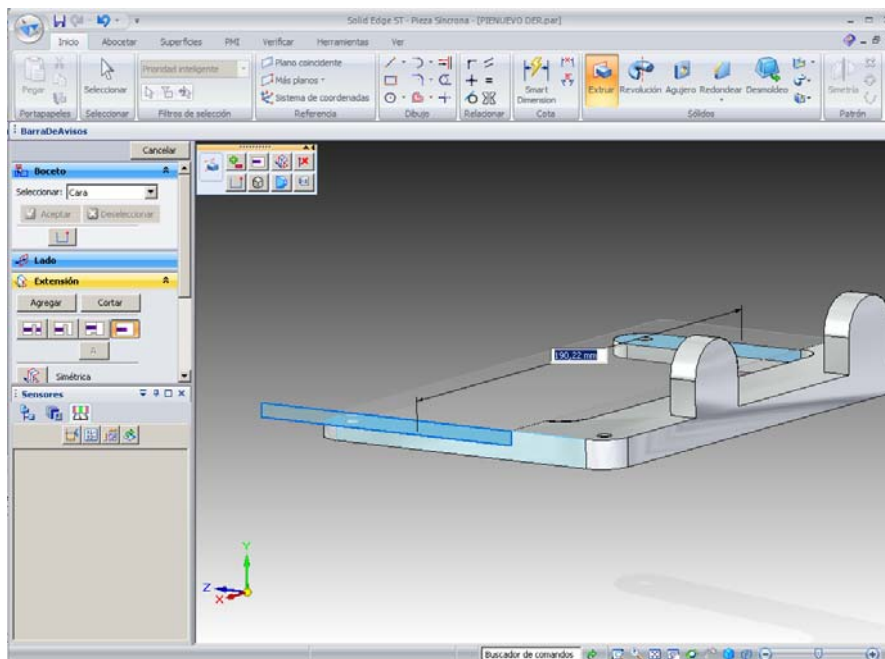


Imagen 3.2.9: Operación de vaciado

El último paso en el modelado de piezas fue definir sus propiedades físicas mediante la elección del material. Este paso es fundamental ya que aporta datos de la pieza como su peso o sus momentos de inercia, fundamentales para los análisis posteriores.

- Elección del material.

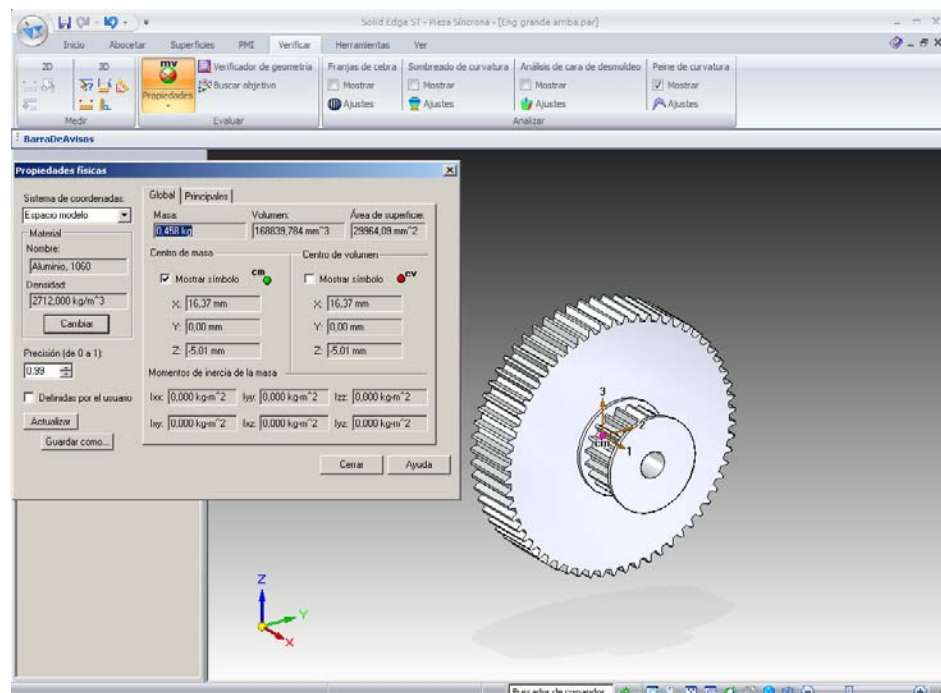


Imagen 3.2.10: Elección del material

Una vez que han sido modeladas todas las piezas de PASIBOT, se han de unir unas con otras para crear subconjuntos de piezas. A su vez, estos subconjuntos se unirán más tarde para formar el conjunto final. Esta etapa del modelado resulta especialmente delicada, ya que realizar las uniones de manera correcta resulta vital para no tener problemas al importar el conjunto al software de análisis. Debido a la complejidad de la geometría de PASIBOT, al elevado número de piezas que lo componen y a la potencia de cálculo limitada de los ordenadores en los que se ha desarrollado este proyecto, se han diseñado dos modelos de PASIBOT: el modelo real y el modelo simplificado. Al igual que se ha descrito en este apartado, para la etapa de ensamblaje y unión de las piezas no se demostrará todo lo que se puede hacer con SOLID EDGE ST, simplemente se trata de una guía con los pasos más comunes.

3.2.1 El modelo real

Para el modelado completo del robot PASIBOT, se ha descompuesto el conjunto en tres subconjuntos: “*pierna izquierda*”, “*pierna derecha*” y “*cadera*”. Para la obtención de estos tres subconjuntos se han utilizado las siguientes técnicas básicas de creación de conjuntos

- Elegir la entrada *conjunto ISO síncrono* en la ventana de inicio del programa.

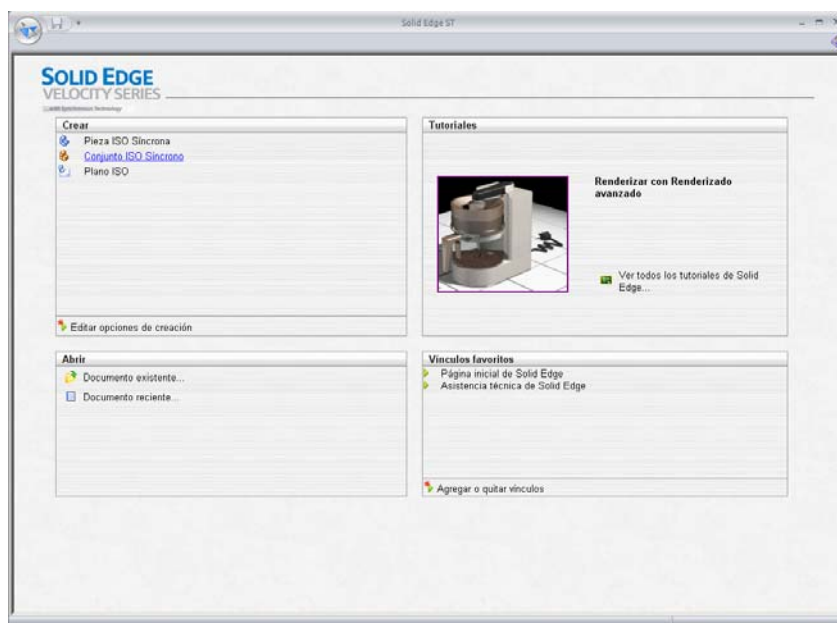


Imagen 3.2.1.1: Ventana inicio programa

Modelado y simulación del robot PASIBOT. Estudio de la rigidez y mejora en la prevención del vuelco lateral.

- Introducir desde la biblioteca de piezas, las piezas que se quieren unir.

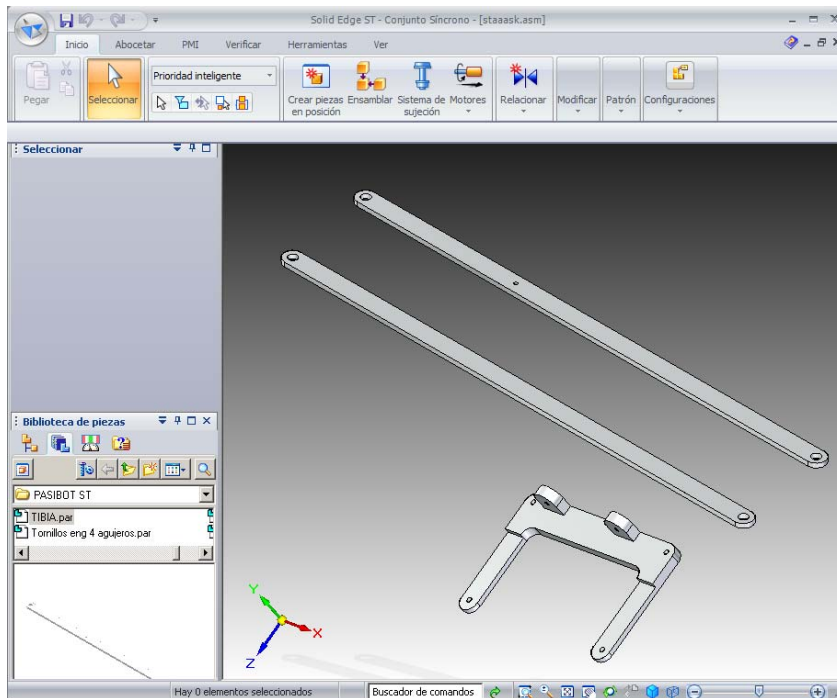


Imagen 3.2.1.2: Selección de piezas

Una vez que han sido introducidas, se aplican las relaciones de conjunto entre piezas. La primera relación que se describe es la más usada y nos servirá para aplicar una condición de coincidencia. Esta relación coloca una pieza orientando dos caras planas de forma que estén frente a frente.

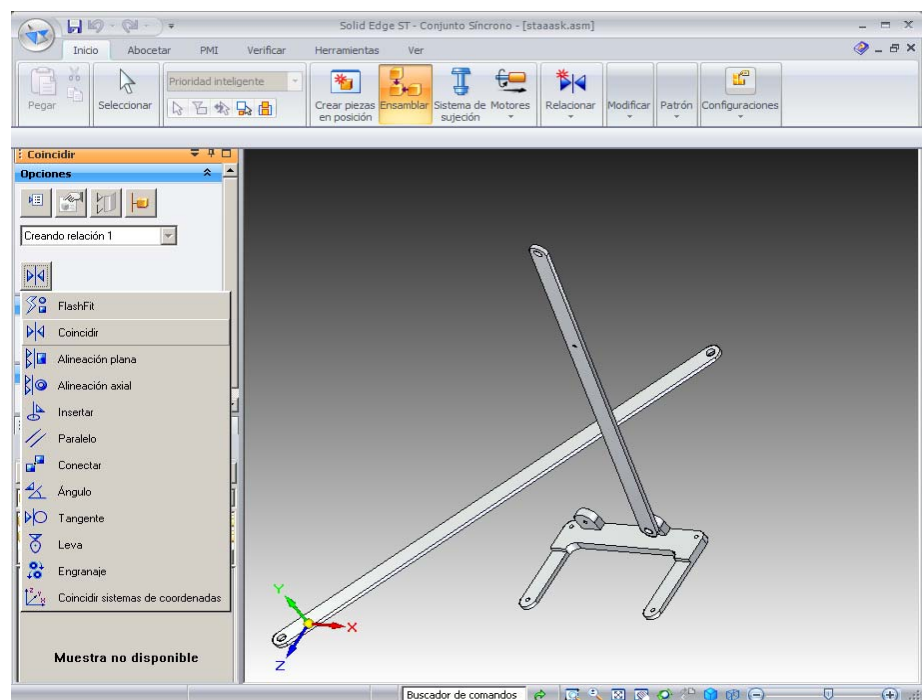


Imagen 3.2.1.3: Relación “coincidir”

Modelado y simulación del robot PASIBOT. Estudio de la rigidez y mejora en la prevención del vuelco lateral.

- Selección de las caras que se quieren casar. Las caras de ambas piezas, aunque están desplazadas, se encuentran una enfrente de la otra.

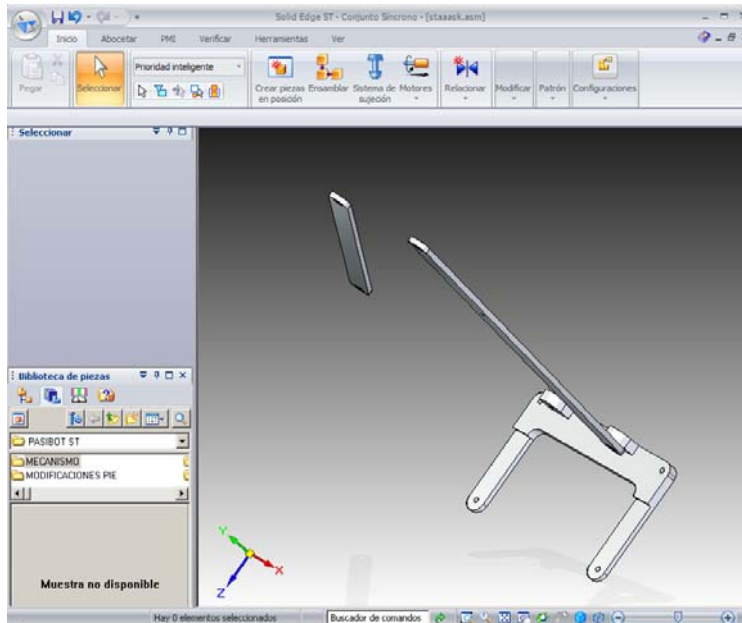


Imagen 3.2.1.4: Caras coincidentes

Otra relación de conjunto imprescindible para lograr el montaje de PASIBOT es la *alineación axial*. Con esta relación establecemos una alineación entre los ejes de las dos piezas.

- Alineación de ejes entre los agujeros cilíndricos.

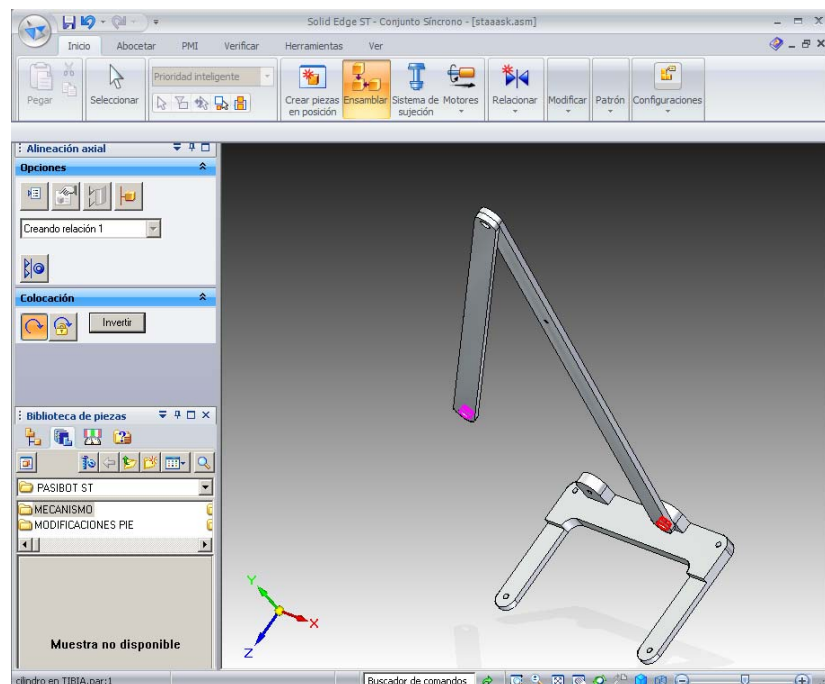


Imagen 3.2.1.5: Alineación axial

Modelado y simulación del robot PASIBOT. Estudio de la rigidez y mejora en la prevención del vuelco lateral.

La última relación de conjunto, de gran utilidad para este proyecto, es *insertar*. Gracias a este comando es posible introducir los tornillos en sus agujeros correspondientes.

- Insertar tornillos

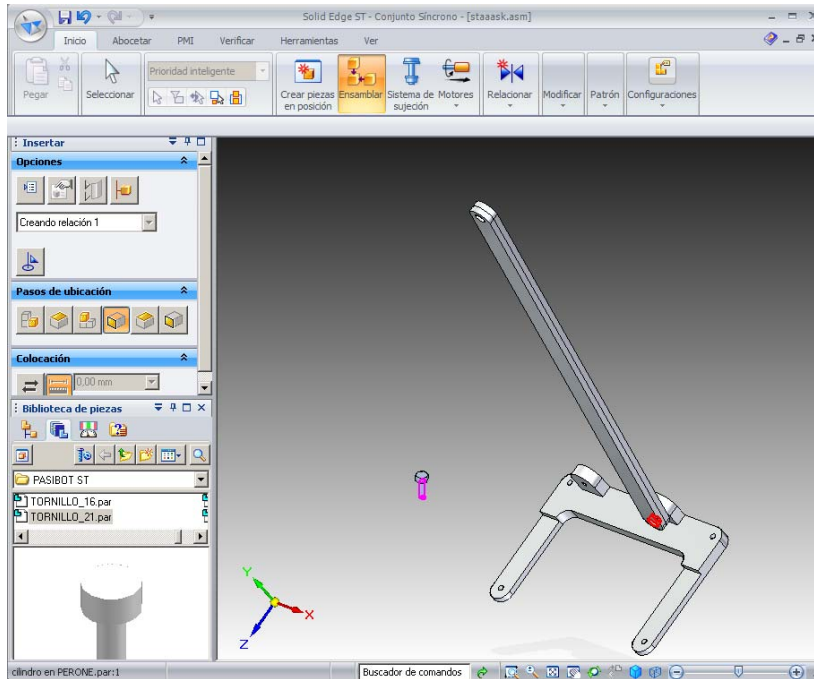


Imagen 3.2.1.6: Insertar tornillos

- Observar el resultado

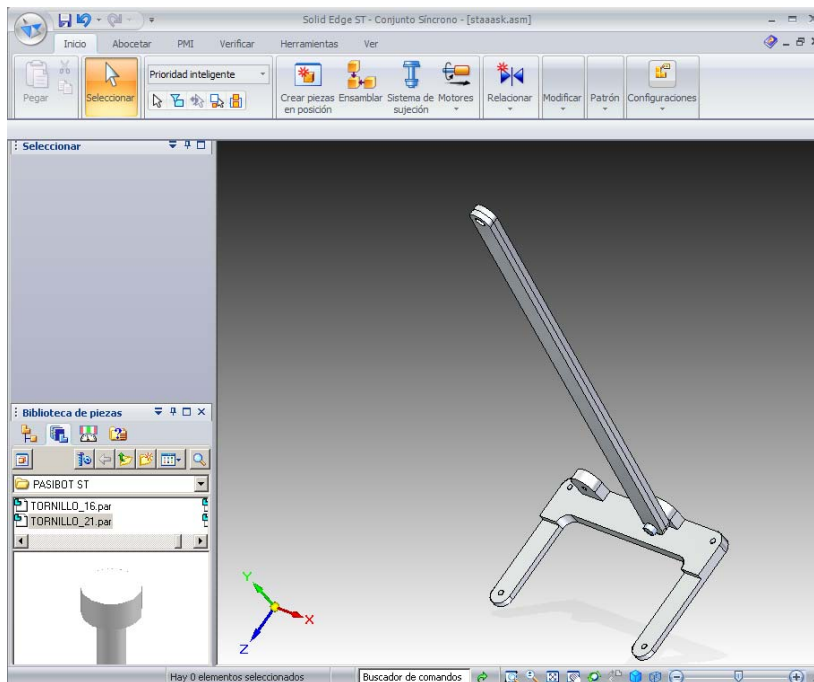


Imagen 3.2.1.7: Piezas ensambladas

Utilizando estos comandos se establecen las relaciones, pieza a pieza, hasta formar los tres subconjuntos que se muestran a continuación.

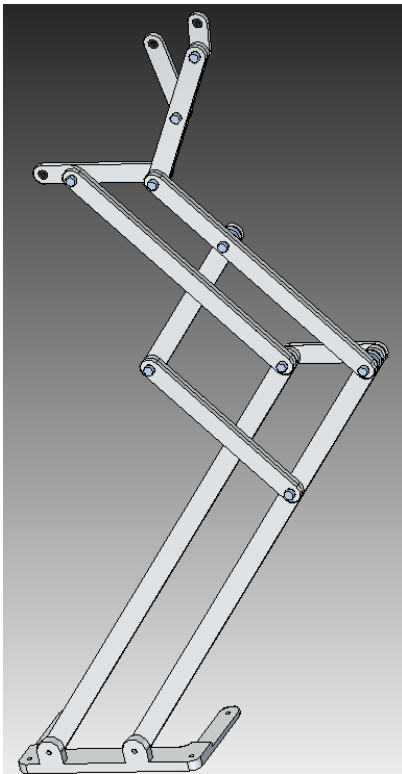


Imagen 3.2.1.8: “pierna derecha”

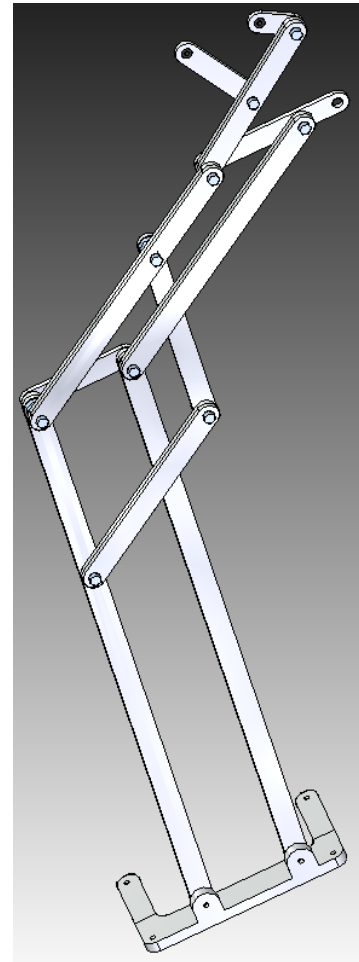


Imagen 3.2.1.9: “pierna izquierda”

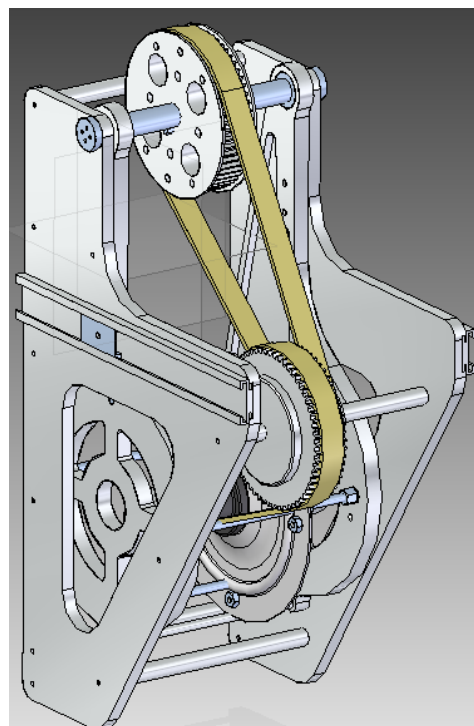


Imagen 3.2.1.10: “cadera”

Modelado y simulación del robot PASIBOT. Estudio de la rigidez y mejora en la prevención del vuelco lateral.

El resultado de relacionar estos tres subconjuntos se muestra en la siguiente imagen renderizada, imagen 3.1.2.11. Una vez terminado el modelado también podemos obtener gracias a SOLID EDGE ST las características físicas del conjunto. Por ejemplo, en la imagen 3.1.2.12 se muestran las posiciones de los c.d.m. y volumen del conjunto.



Imagen 3.1.2.11: Conjunto PASIBOT

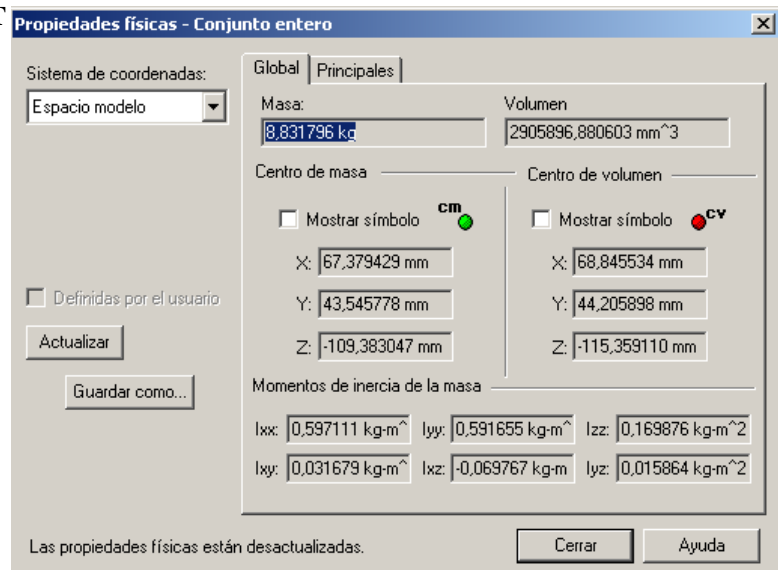


Imagen 3.1.2.12: Propiedades físicas conjunto PASIBOT

3.2.2 El modelo simplificado

La necesidad de crear un modelo simplificado surge de las limitaciones impuestas por la herramientas informáticas empleadas en el desarrollo del proyecto. El modelo real de PASIBOT está compuesto por un gran número de piezas, con relaciones de unión entre ellas, lo que supone una gran cantidad de ecuaciones a resolver por el software de análisis que resulta excesiva para la capacidad de los ordenadores. Con el fin de obtener un problema analizable por parte del sistema informático se han reducido las ecuaciones a resolver, simplificando el modelo como se muestra y explica a continuación.



Imagen 3.2.2.1: Modelo simplificado

- Para el modelo simplificado tan sólo se han considerado los eslabones que sufren una mayor deformación elástica, tibia y peroné, así como las piezas que se unen a ambos, pie y rodilla. El resto del conjunto mecánico se ha sustituido por los esfuerzos que transmitía a los eslabones considerados, esfuerzo axial y momento flector.

- Los elementos de unión entre estas cuatro piezas como tornillos, rodamientos o arandelas, han sido eliminados ya que las relaciones de unión establecidas permiten simular el efecto que éstos producen y además, suponen una fuente de errores en FEMAP.

- Por último, se ha sustituido el modelo de eslabones dobles por el de un único eslabón, ya que el primer modelo resultaba problemático en FEMAP. Más adelante se realizará un análisis que mostrará la escasa influencia que esta simplificación tiene en los resultados obtenidos.

3.3 Solución al problema planteado

El problema del robot PASIBOT es que vuelca cuando levanta uno de sus pies para comenzar la marcha. Este comportamiento inestable es debido únicamente a que la proyección del c.d.m. del robot se sale de la zona de estabilidad, la planta del pie, en la que no se produciría el vuelco. Una vez estudiado el problema y analizadas las causas que lo provocan, se proponen **tres modificaciones** independientes y encaminadas a solucionarlo. La primera de ellas consiste en **reducir la distancia en el plano frontal entre el c.d.m y el eje de los eslabones que sufren mayor deformación**, disminuyendo así el momento flector en los eslabones y por lo tanto, la flexión que se produce. La segunda solución se centra en **aumentar la rigidez del conjunto mecánico**, variando el diseño pero no las propiedades físicas del robot. Y la tercera implica **rediseñar el pie** para reducir drásticamente las holguras en las uniones.

3.3.1 Mecanismo corrector

Para implementar la primera de las soluciones propuestas se ha diseñado un mecanismo capaz de corregir la desviación del c.d.m durante la fase de apoyo simple. El mecanismo consiste en dos masas que rotan sobre un eje, en sentidos opuestos y de forma alternativa, de tal manera que el peso de ambas masas corrige la desviación excesiva del c.d.m y mantiene su posición dentro de la zona de estabilidad. Este desequilibrio del c.d.m. se produce tan sólo en el plano frontal, ya que gracias a su diseño simétrico se mantiene invariable en los otros planos. El movimiento de rotación de estas masas se obtiene del motor que alimenta a todo el robot.

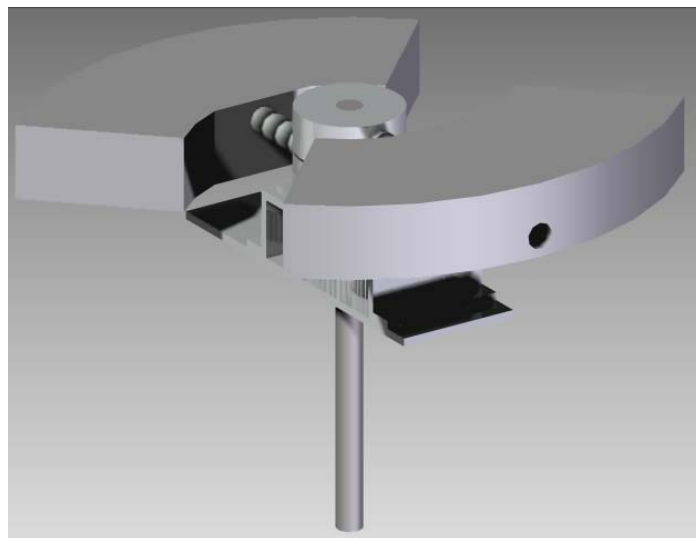


Imagen 3.3.1.1: Mecanismo corrector

Con el fin de poder calibrar el desequilibrio producido por el mecanismo se han roscado los ejes que sostienen las masas, pudiéndose variar la distancia de estas al eje de rotación según sea conveniente. Esta solución se expone de una manera más detallada en otro Proyecto Fin de Carrera: “Análisis del vuelco lateral del robot PASIBOT. Diseño de un mecanismo compensador” de Carlos Hernández Molina La imagen 3.3.2 muestra con un punto verde la posición del c.d.m. del conjunto y se observa el desequilibrio producido por el mecanismo durante medio ciclo.

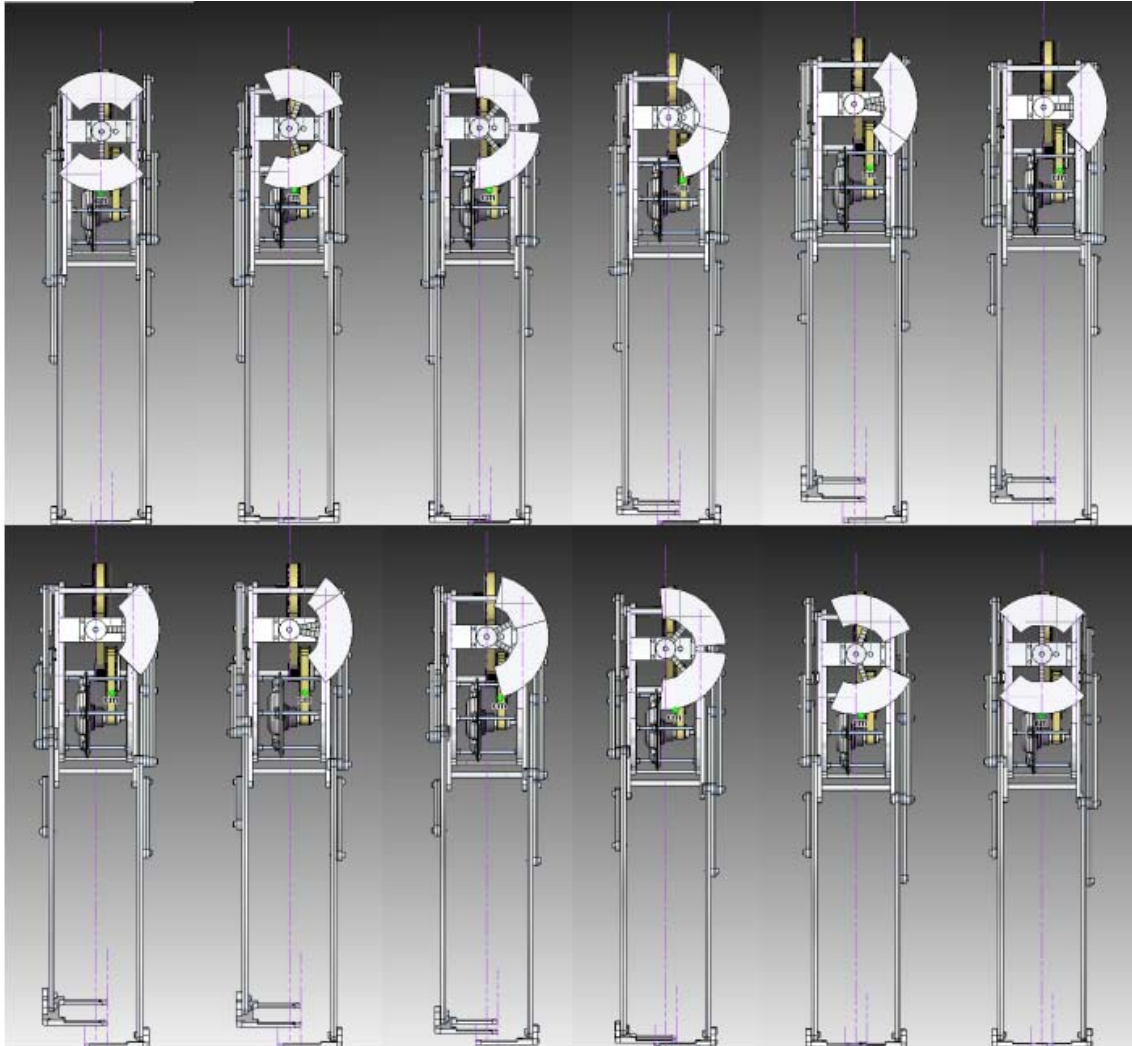


Imagen 3.3.1.2: Desequilibrio producido por el mecanismo

Esta no es la posición real del c.d.m. del prototipo PASIBOT ya que con SOLID EDGE ST trabajamos bajo la hipótesis de sólido rígido, sin deformaciones. Sin embargo, en la imagen se observa con claridad como el mecanismo va a contrarrestar el desplazamiento producido por las deformaciones y las holguras, con un desplazamiento del c.d.m. en sentido contrario.

3.3.2 Modificación de la sección; aumento de rigidez

En ingeniería, la rigidez es la capacidad de un sólido o elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones o desplazamientos. Cuando se utiliza el término de rigidez global, se hace referencia a la rigidez que muestra PASIBOT como conjunto de sólidos. Esta característica resulta de vital importancia en este caso ya que el problema que se plantea en este proyecto es consecuencia del desplazamiento que sufre el conjunto en una de las fases de la marcha. Este desplazamiento, como se ha explicado en capítulos anteriores, no se debe exclusivamente a la flexión producida en los eslabones a causa de los esfuerzos, sino que la existencia de holguras en las uniones hace que el desplazamiento del conjunto sea aún mayor. Más adelante, en el capítulo siguiente, se cuantificará la influencia que tienen cada uno de ellos por separado en el desplazamiento total. Por todo esto, la propuesta de mejora de rigidez del robot se divide en dos partes: mejorar el comportamiento en régimen elástico de los eslabones que sufren mayor flexión y evitar físicamente la aparición de las holguras.

El comportamiento elástico de los eslabones de PASIBOT depende fundamentalmente de dos factores:

- La sección transversal, a través de su momento de inercia.
- El material, a través de su módulo de Young.

Para la fabricación de los eslabones se ha empleado aluminio, un metal que posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil para la ingeniería mecánica. Sus propiedades de mayor relevancia para este caso son su baja densidad (2.700 kg/m^3) y su elevado valor del módulo de Young (70.000 MPa). El módulo de elasticidad o módulo de Young es el parámetro que caracteriza la deformación de un material elástico sometido a tensión.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E}$$

E es el módulo de elasticidad longitudinal.

σ es la presión ejercida sobre el área de sección transversal

ϵ es la deformación unitaria en cualquier punto de la barra.

Las deformaciones de los eslabones de PASIBOT en fase de apoyo simple son principalmente de flexión. A este tipo de deformación se le denomina flexión. Un caso típico son las vigas, que están diseñadas para trabajar, principalmente, a flexión. El rasgo más destacado es que un objeto sometido a flexión presenta una superficie de puntos llamada fibra neutra tal que la distancia a lo largo de cualquier curva contenida en ella no varía con respecto al valor antes de la deformación. El esfuerzo que provoca la flexión se denomina momento flector. En este caso la deformación depende, aparte de el módulo de elasticidad (E), del momento aplicado (M_z) y del momento de inercia de la sección transversal del eslabón (I_z).

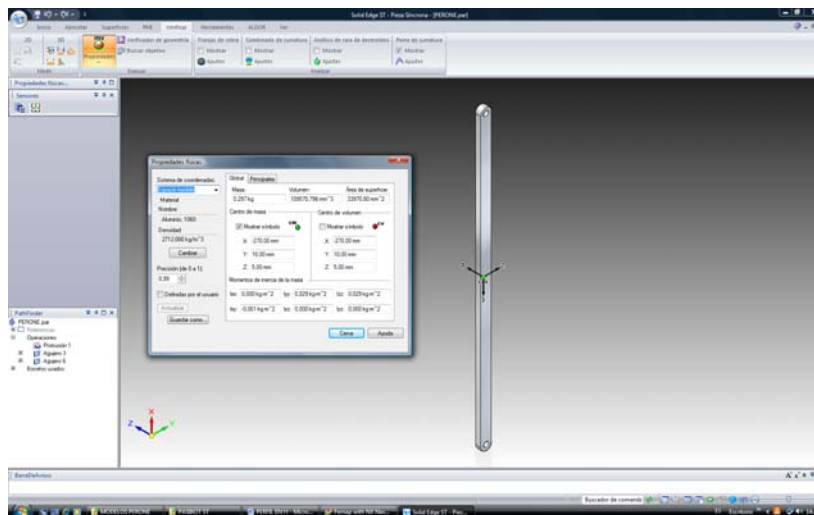
$$\epsilon_x = \frac{M_z}{E \cdot I_z}$$

En esta ecuación los parámetros que pueden ser modificados son el módulo de elasticidad y el momento de inercia ya que el momento aplicado es un valor definido por el peso del robot y la distancia a la que está aplicado. Por esto, para conseguir reducir el desplazamiento se ha de aumentar el valor de E, o bien el de I_z o el de ambos. El módulo de elasticidad depende del material empleado mientras que el momento de inercia depende de la geometría de la sección. Para aumentar el valor de E habría que elegir un material con propiedades elásticas mayores a las del aluminio. Esto resultaba un problema ya que los materiales que mejoraban las prestaciones mecánicas del aluminio son considerablemente más caros, o bien, con una densidad varias veces mayor. Aumentar considerablemente el coste de producción no era una opción. Por otra parte, elegir un material de mayor densidad implicaba, no solo volver a fabricar PASIBOT, también colocar un motor más potente que suministrase el par necesario para mover un conjunto que sería mucho más pesado que el actual. Un motor más potente tampoco resultó aceptable, por lo que si se quería emplear un metal de mayor densidad habría que rediseñar el modelo de PASIBOT para adaptarlo a las limitaciones del motor. Por todo esto se desechó la idea de cambiar el material y se optó por aumentar el valor del momento de inercia sin variar las características físicas del robot.

El momento de inercia es una propiedad geométrica de una superficie que representa la distancia de un área con respecto a un eje dado. Se define como la suma de los productos de todas las áreas elementales multiplicadas por el cuadrado de las distancias a un eje [10]. Es importante para el análisis de vigas y columnas, ya que el momento de inercia define la forma apropiada que debe tener la sección del elemento estructural. El momento de inercia sólo depende de la geometría del cuerpo y de la posición del eje de giro, pero no de las fuerzas que intervienen en el movimiento.

Para poder aumentar de manera considerable el momento de inercia de la sección del eslabón sin variar otros parámetros, se elige un modelo de perfil muy utilizado en construcción para soportar esfuerzos de flexión y compresión, un perfil HE. Estos perfiles tienen un momento de inercia muy elevado debido a la geometría de su perfil en la que gran parte del material esta alejado del eje de giro.

1. Utilizando una de las aplicaciones de SOLID EDGE ST se obtiene el volumen que ocupa la pieza.



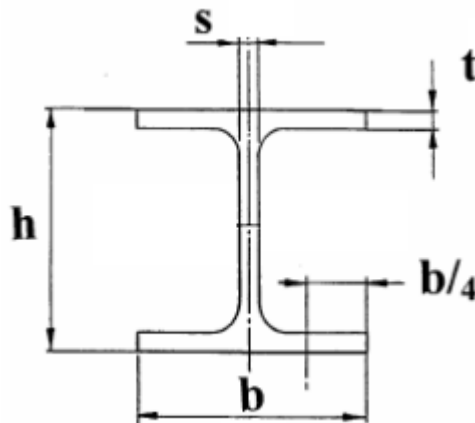
$$V = 109571 \text{ mm}^3$$

Imagen 3.3.2.1: Volumen del eslabón

El nuevo eslabón que se propone colocar con perfil en H ha de ocupar el mismo volumen que el anterior. Al tener el mismo volumen y estar fabricado con el mismo material, el cambio de eslabón tan sólo aumentará su momento de inercia sin afectar a

otros parámetros del robot. Por ejemplo, si el nuevo eslabón ocupase un volumen mayor, su peso sería también mayor. Al pesar más los eslabones sería necesario utilizar otro motor que suministre mayor par para poder mover las nuevas masas.

2. Calcular la geometría del nuevo perfil. Los perfiles en H siempre guardan una proporción entre sus dimensiones por lo que resulta sencillo dimensionar el perfil de tal forma que el volumen del eslabón se mantenga constante. La imagen 3.3.2.2 muestra las dimensiones características del nuevo perfil.



Proporciones geométricas perfil en H:

$$h = b = x$$

$$t = 0.1x$$

$$s = 0.06x$$

$$\boxed{\text{Volumen} = \text{Superficie} \times \text{Longitud}}$$

$$\text{Volumen} = 109571 \text{mm}^3; \text{Longitud} = 500 \text{mm}$$

$$\text{Superficie} = [(t \times b) \times 2] + [(h - 2 \times t) \times s]$$

$$\text{Superficie} = 0.2x^2 + 0.42x^2 = 0.62x^2$$

$$109571 \text{mm}^3 = 0.62x^2 \times 500 \text{mm} \longrightarrow \boxed{x = 18.8 \text{mm}}$$

3. Utilizando SOLID EDGE ST modelamos el nuevo eslabón con las dimensiones del perfil calculadas. En la imagen 3.3.2.3 se muestra el nuevo eslabón y se observa como el volumen ocupado por la nueva pieza es prácticamente el mismo que el anterior.

$$V = 109711,541\text{mm}^3$$

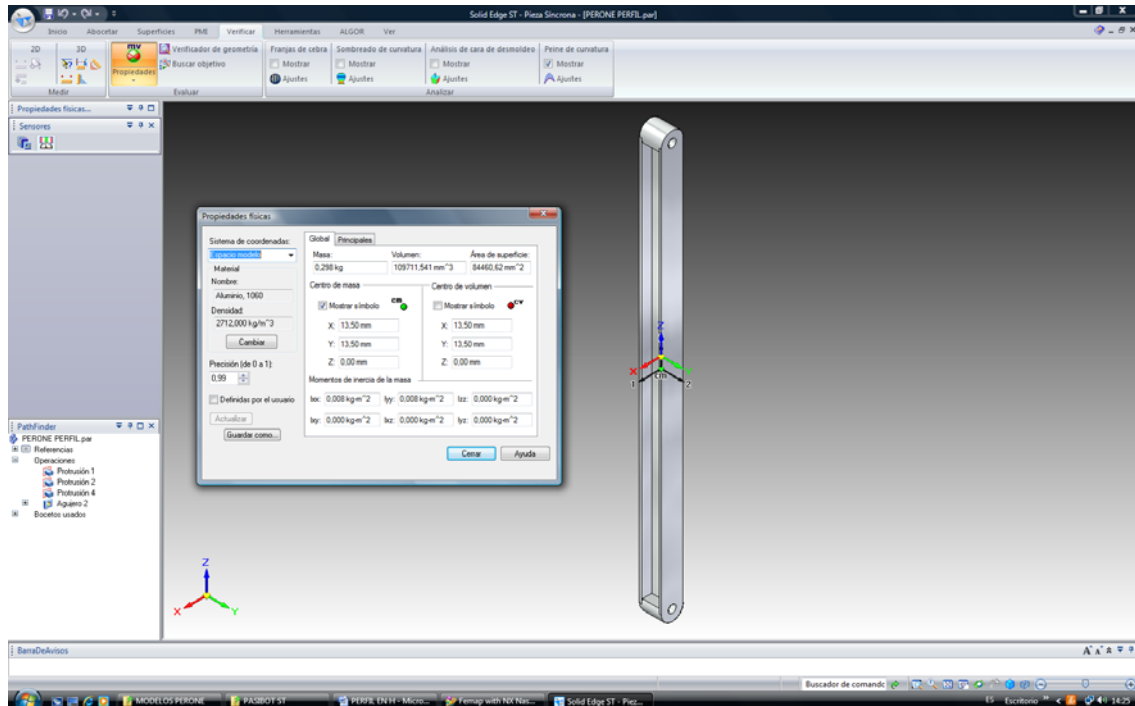


Imagen 3.3.2.2: Eslabón con perfil H

Estos eslabones tan solo sustituirán a los eslabones tibia y peroné, por ser los más solicitados dinámicamente y, por lo tanto, los principales causantes del desplazamiento del sistema.

3.3.3 Nuevo diseño del pie

La aparición de holguras en las uniones no resulta solo de las limitaciones del rodamiento y de un imperfecto proceso de montaje, sino que las solicitaciones a las que está sometida la unión, los materiales y la geometría de la unión también influyen. De manera experimental, se observa que las uniones con mayores holguras son las que unen los pies con el resto del conjunto mecánico. Por esto, se ha ideado un nuevo diseño del pie con el fin de evitar físicamente la holgura. Con este nuevo modelo de pie se pretende reducir drásticamente la holgura en la unión. En el capítulo siguiente se cuantificará la influencia de este nuevo diseño en el desplazamiento del c.d.m. del conjunto. En la imagen 3.3.2.4 se muestra el nuevo modelo de pie propuesto.

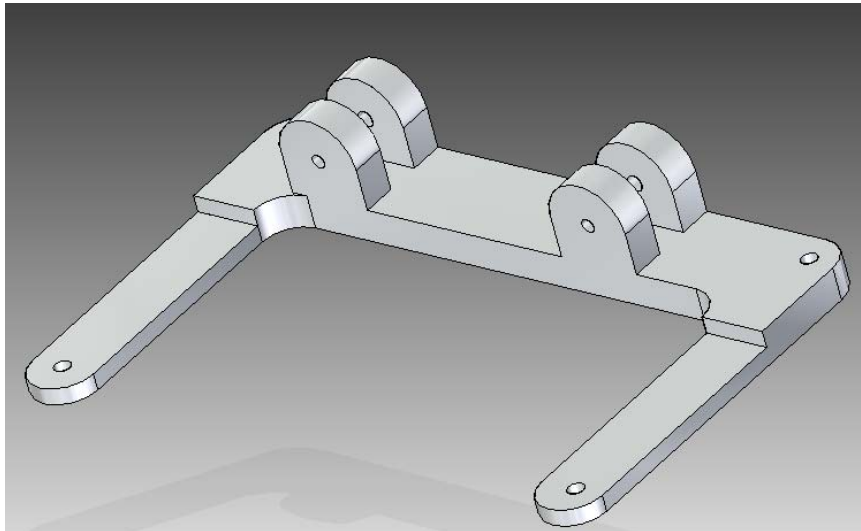
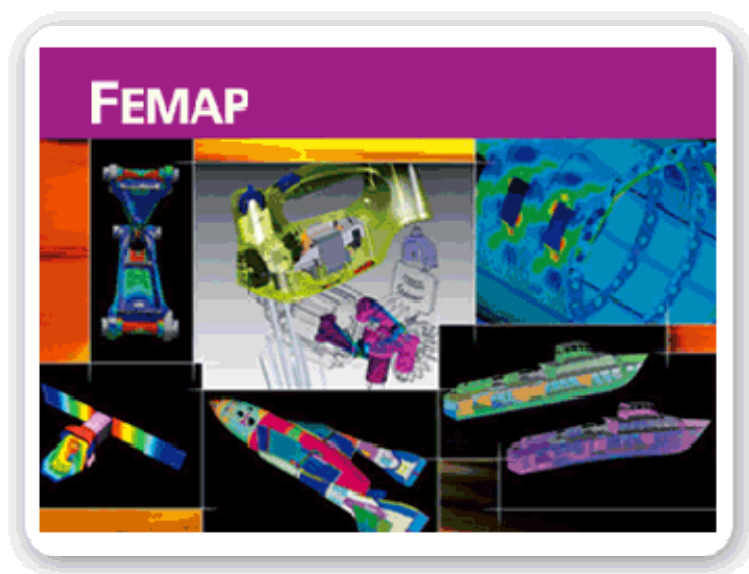


Imagen 3.3.2.3: Nuevo diseño de pie

Capítulo IV: Análisis y resultados



4.1 Posición del c.d.m.

4.1.1 Hipótesis de sólido rígido

Obtener la posición del c.d.m. del robot PASIBOT resulta sencillo gracias a SOLID EDGE. Este programa tiene una aplicación que calcula características físicas y geométricas de sólidos o de conjuntos de sólidos; masa, volumen, posición del c.d.m, posición del c.d.v., momentos de inercia, etc. Esta aplicación ofrece resultados de gran exactitud pero presenta un inconveniente fundamental en este caso: considera todos los **sólidos como rígidos sin tener en cuenta su elasticidad** y por tanto las deformaciones que sufren al estar solicitados. Por esto, los resultados que vamos a obtener en este apartado poseen un mayor valor teórico que práctico. La imagen 4.1.1.1 muestra la interface de esta aplicación con los resultados obtenidos para la posición inicial del ciclo de la marcha, con $\theta = 0^\circ$ en la manivela. El origen de coordenadas se sitúa en la cadera del robot.

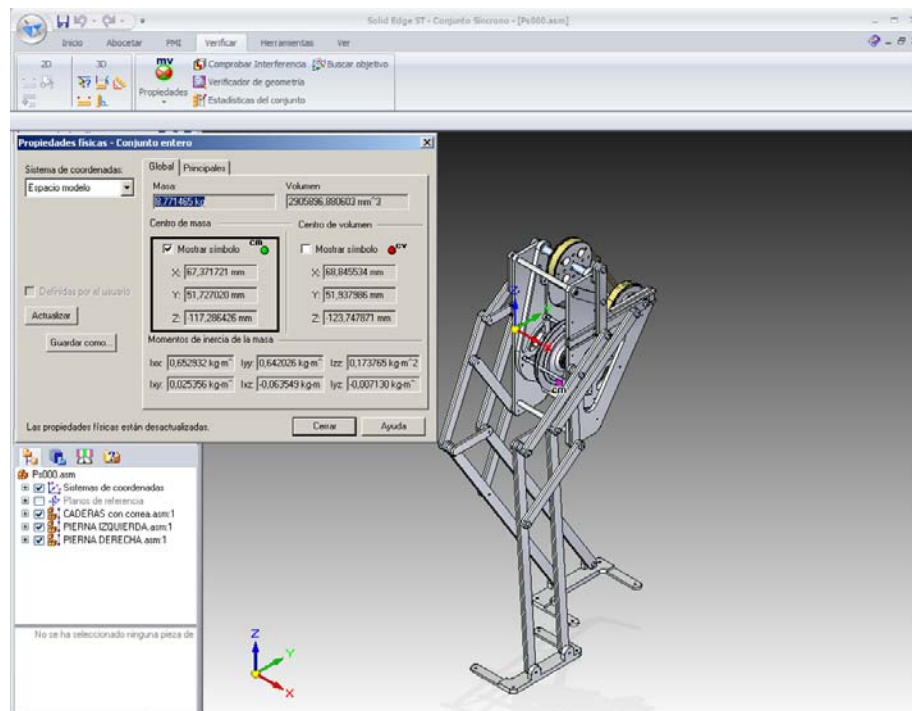


Imagen 4.1.1.1: Posición 0 del c.d.m.

Al tratarse de un mecanismo de un grado de libertad, si consideramos el pie de apoyo fijo en el suelo la posición de todo el robot, así como las posiciones relativas de sus eslabones, queda completamente definida con un único parámetro. Este parámetro es el giro de la manivela.

La tabla 4.1.1.1 muestra la evolución temporal de la posición del c.d.m. a lo largo de un ciclo completo de la marcha, en las tres direcciones principales y con el origen de coordenadas situado en la cadera.

θ manivela [°]	Xg [mm]	Yg [mm]	Zg [mm]
0	67,371721	51,72702	-117,286426
10	67,371721	52,640735	-117,56945
20	67,371721	53,344642	-117,688893
30	67,371721	53,767402	-117,812048
40	67,371721	53,67823	-117,660582
50	67,371721	52,936449	-117,161902
60	67,371721	51,397751	-116,044767
70	67,371721	49,327685	-114,336219
80	67,371721	47,007925	-111,95719
90	67,371721	45,237029	-109,816602
100	67,371721	44,458634	-109,059855
110	67,371721	44,562954	-109,865468
120	67,371721	45,257011	-111,468422
130	67,371721	46,270952	-113,131743
140	67,371721	47,4021	-114,511641
150	67,371721	48,538004	-115,542911
160	67,371721	49,640398	-116,281926
170	67,371721	50,703423	-116,813077
180	67,371721	51,713503	-117,20519
190	67,371721	52,624164	-117,496024
200	67,371721	53,344642	-117,688893
210	67,371721	53,739482	-117,750169
220	67,371721	53,642399	-117,600383
230	67,371721	53,642399	-117,600383
240	67,371721	52,891768	-117,099092
250	67,371721	51,397751	-116,044767
260	67,371721	49,264391	-114,259293
270	67,371721	46,952743	-111,884012
280	67,371721	44,438882	-109,074769
290	67,371721	44,554246	-109,929793
300	67,371721	45,256754	-111,561536
310	67,371721	46,276943	-113,236889
320	67,371721	47,411801	-114,61878
330	67,371721	48,549226	-115,646517
340	67,371721	49,651996	-116,379098
350	67,371721	50,715468	-116,902468
360	67,371721	51,72702	-117,286426

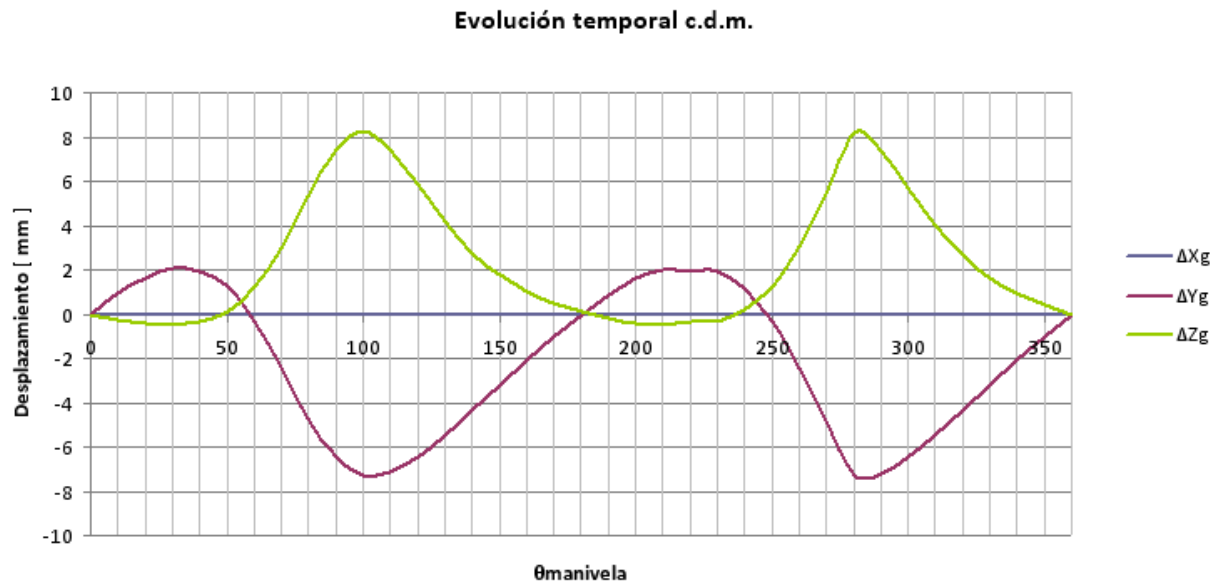
Tabla 4.1.1.1: Evolución temporal del c.d.m.

Modelado y simulación del robot PASIBOT. Estudio de la rigidez y mejora en la prevención del vuelco lateral.

En la página anterior se muestra una tabla con los valores que nos proporciona SOLID EDGE para cada $\theta_{manivela}$ con respecto al origen de coordenadas de la cadera, pero resulta más interesante observar cuál es la variación temporal del c.d.m. con respecto a su posición inicial. En la tabla 4.1.1.2 se muestran los valores de la página anterior pero tomando como referencia la posición inicial $\theta = 0^\circ$.

$\theta_{manivela} [^\circ]$	$\Delta Xg [mm]$	$\Delta Yg [mm]$	$\Delta Zg [mm]$
0	0	0	0
10	0	0,913715	-0,283024
20	0	1,617622	-0,402467
30	0	2,040382	-0,525622
40	0	1,95121	-0,374156
50	0	1,209429	0,124524
60	0	-0,329269	1,241659
70	0	-2,399335	2,950207
80	0	-4,719095	5,329236
90	0	-6,489991	7,469824
100	0	-7,268386	8,226571
110	0	-7,164066	7,420958
120	0	-6,470009	5,818004
130	0	-5,456068	4,154683
140	0	-4,32492	2,774785
150	0	-3,189016	1,743515
160	0	-2,086622	1,0045
170	0	-1,023597	0,473349
180	0	-0,013517	0,081236
190	0	0,897144	-0,209598
200	0	1,617622	-0,402467
210	0	2,012462	-0,463743
220	0	1,915379	-0,313957
230	0	1,915379	-0,313957
240	0	1,164748	0,187334
250	0	-0,329269	1,241659
260	0	-2,462629	3,027133
270	0	-4,774277	5,402414
280	0	-7,288138	8,211657
290	0	-7,172774	7,356633
300	0	-6,470266	5,72489
310	0	-5,450077	4,049537
320	0	-4,315219	2,667646
330	0	-3,177794	1,639909
340	0	-2,075024	0,907328
350	0	-1,011552	0,383958
360	0	0	0

Tabla 4.1.1.2: Evolución temporal del c.d.m. con valores incrementales



Gráfica 4.1.1.1: Evolución temporal c.d.m. con valores incrementales

Los valores obtenidos en SOLID EDGE nos indican que la posición del c.d.m. en el eje sagital (eje x) es constante a lo largo de todo el ciclo. Esto no es real ya que, como se ha explicado con anterioridad, SOLID EDGE entiende al robot como sólido rígido y, por lo tanto, no tiene en cuenta las deformaciones ni las holguras. Sin embargo, es de vital importancia para el presente proyecto conocer la posición según el eje x del c.d.m con respecto al pie de apoyo. Esta superficie delimita la zona de estabilidad del robot, por lo que al situar el c.d.m. dentro de ella obtendremos el valor del desplazamiento máximo admisible. En los capítulos siguientes se mostrará que el desplazamiento del c.d.m. debido a flexión y holguras es mayor que este valor máximo admisible, y cómo las mejoras propuestas reducen este desplazamiento hasta un valor inferior al máximo admisible. En la imagen 4.1.1.2 se muestra la vista en planta del pie de PASIBOT, con la posición del c.d.m. en el plano sagital indicada con un punto.

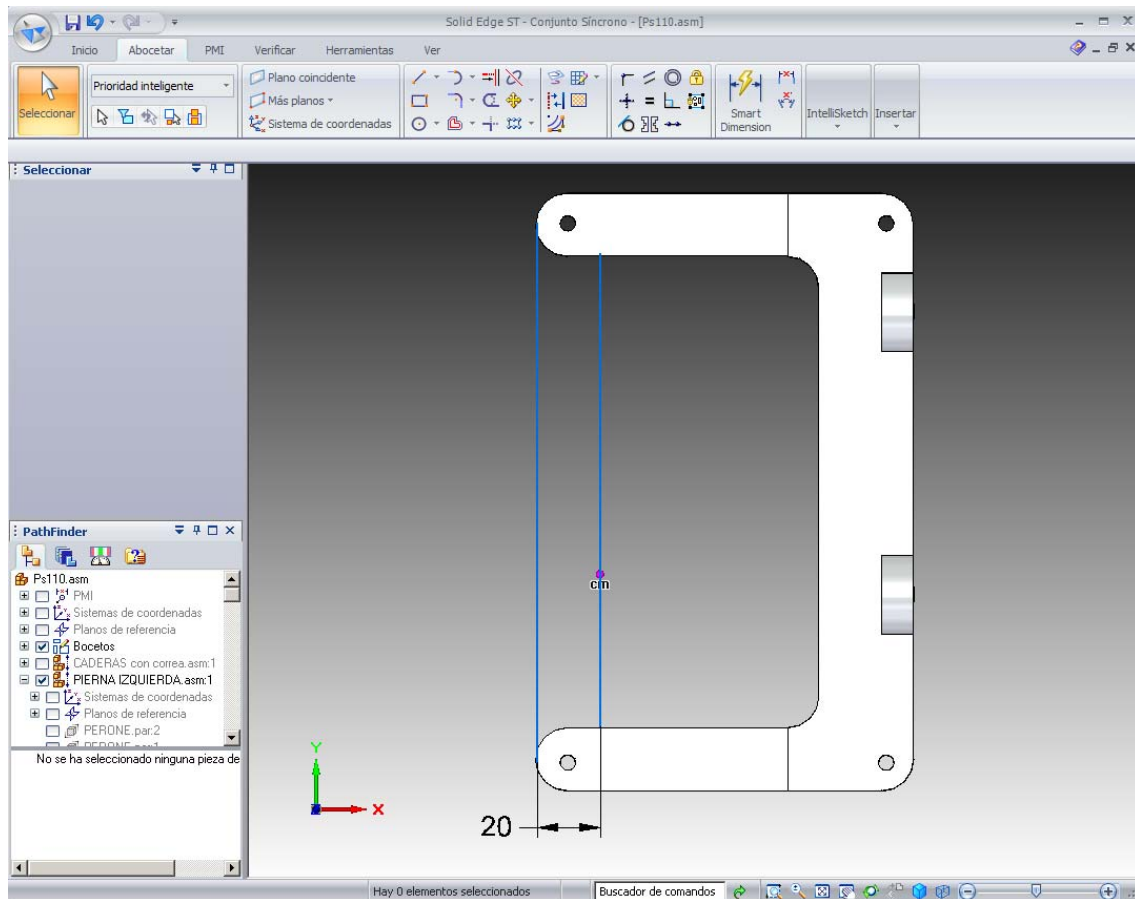


Imagen 4.1.1.2: Posición c.d.m. en plano sagital respecto al pie

Como se muestra en la imagen, **el máximo desplazamiento admisible según el eje x es de 20 mm. Cualquier desplazamiento inferior a este no produciría el efecto de vuelco en el robot.** Por el contrario, si la flexión de los eslabones y las holguras generan un desplazamiento del c.d.m superior a 20 mm, el robot volcará cuando levante uno de sus pies para iniciar la marcha. Por esto, se comprobará que las dos propuestas de mejora del presente proyecto cumplen esta condición.

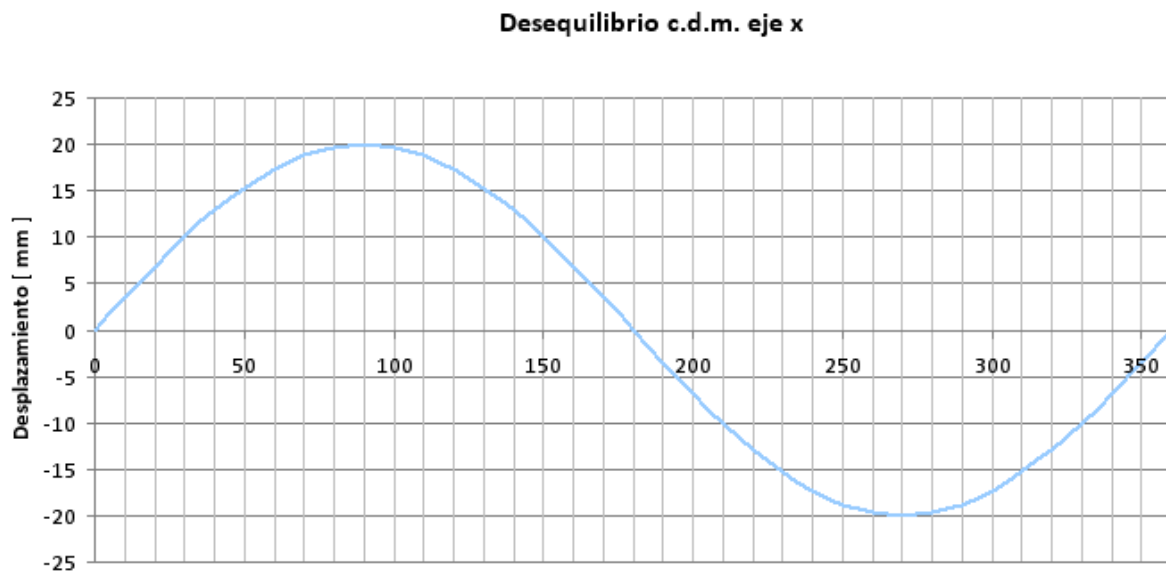
4.1.2 Colocación del mecanismo corrector



Imagen 4.1.2.1: PASIBOT con mecanismo corrector

El mecanismo corrector fue ideado para crear un desequilibrio del c.d.m. en el plano sagital, que compensase el desplazamiento generado por la flexión y las holguras en el robot. Los fundamentos teóricos del mecanismo se detallan en el siguiente Proyecto Fin de Carrera: “*Análisis del vuelco lateral del robot PASIBOT. Diseño de un mecanismo compensador*” Para saber cuál debía de ser el desequilibrio corrector, lo primero era conocer aproximadamente el desequilibrio real que sufría el prototipo de PASIBOT. Este desplazamiento fue medido experimentalmente utilizando los medios de los que se disponía. Se estimó un valor de desplazamiento real del c.d.m de 35 mm. El desplazamiento máximo admisible es de 20 mm y el desplazamiento real es aproximadamente de 35 mm. Esto implica que el mecanismo deberá ocasionar un desequilibrio del c.d.m mayor o igual a 15 mm. Con el fin de ponernos del lado de la seguridad y compensar los errores en la medición experimental, se establece que **el mecanismo desplazará el c.d.m. 20 mm de manera alternativa y opuesta al desequilibrio real con el fin de compensarlo.**

El desequilibrio producido por el mecanismo depende de dos factores, el peso que se coloque en las masas oscilantes y la distancia de éstas al eje de giro. Los ejes que sostienen las masas están roscados, por lo que es posible variar con facilidad la distancia al eje de giro y por lo tanto desequilibrar más o menos el robot. No obstante, no es objeto del presente proyecto obtener los valores concretos de masa y distancia, pero sí mostrar cuál debe ser el resultado a obtener. En la gráfica 4.1.2.1 se muestra evolución que ha de tener el desequilibrio producido por el mecanismo a lo largo de un ciclo completo.



Gráfica 4.1.2.1: Desequilibrio eje sagital

4.2 Análisis FEMAP

En este capítulo del proyecto se desarrollarán los análisis realizados con el uso del programa informático FEMAP. Estos análisis tienen como objetivo justificar y validar las propuestas de mejora descritas en los apartados anteriores. Los análisis se han realizado importando las geometrías del programa de modelado, aunque es posible definir sólidos con FEMAP. Las propiedades físicas de los sólidos tampoco ha sido necesario definirlas en FEMAP ya que se introducen directamente al importar las geometrías modeladas con SOLID EDGE ST. Sin embargo, el programa de elementos finitos FEMAP plantea algunos problemas reconociendo las uniones entre los sólidos, por lo que fue necesario definirlas dentro del programa. Se han realizado un total de 4 análisis distintos, todos ellos de carácter estático.

4.2.1 Eslabón doble vs dos eslabones

El primer modelo que fue fabricado de PASIBOT se montó con eslabones simples en las piernas. Cuando se analizó el robot y se averiguaron las causas de su inestabilidad, se implementó una mejora encaminada al aumento de la rigidez del conjunto. Esta mejora consistía en **duplicar**, en los casos en los que era posible, **los eslabones en las piernas de forma que las barras añadidas quedaban sujetas a las originales por las articulaciones**. De este modo se pasó al modelo actual de PASIBOT en el que casi todos los eslabones de las piernas están formados por dos eslabones, y no por uno como en el modelo inicial. Esto mejoró la rigidez del conjunto e hizo que el desplazamiento del c.d.m. en fase de apoyo simple fuera menor. Sin embargo, se pudo haber aumentado considerablemente más la rigidez fabricando eslabones con el doble de espesor que el inicial. Para comprobar que esta teoría es cierta, y conocer el margen real de mejora, se ha realizado el siguiente análisis en FEMAP.

En la imagen 4.2.1.1 se muestran los dos eslabones unidos a los que se les ha sometido a flexión. Los valores que se observan a la derecha de la imagen, asociados a los colores en el eslabón, son valores de desplazamiento en la dirección z. El valor máximo de desplazamiento es de 0.7 mm. En la imagen siguiente, 4.2.1.2, se muestra la deformación que sufre un único eslabón doble, cuyo valor máximo es de 0.09 mm. Lógicamente, la carga de flexión es la misma en ambos casos.

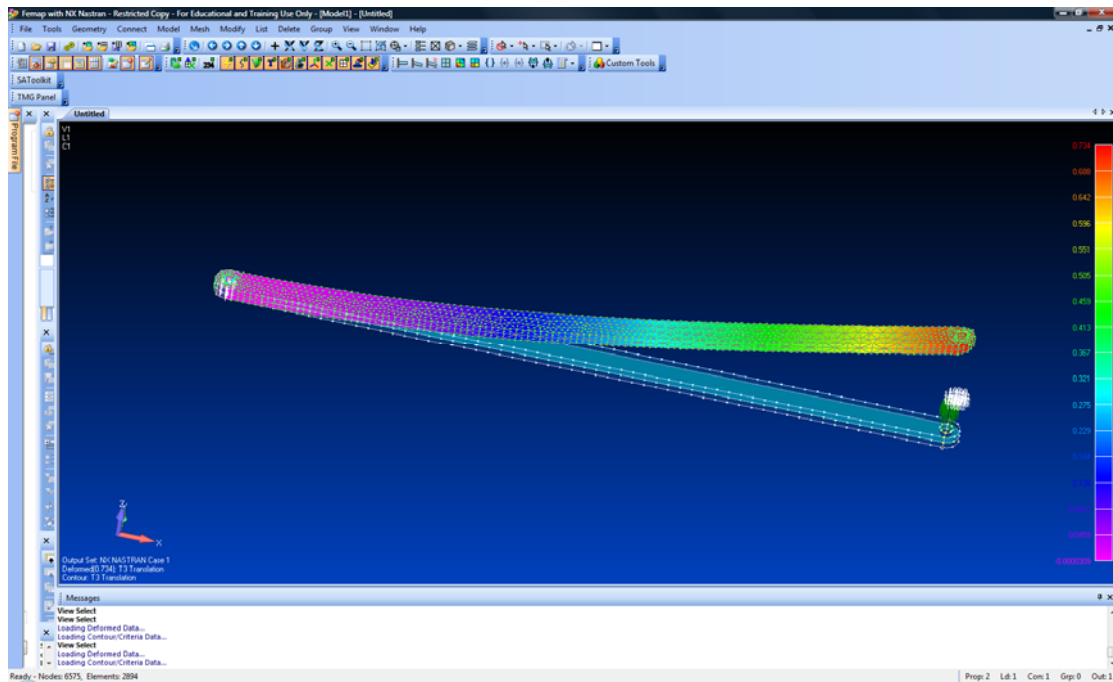


Imagen 4.2.1.1: Deformación dos eslabones

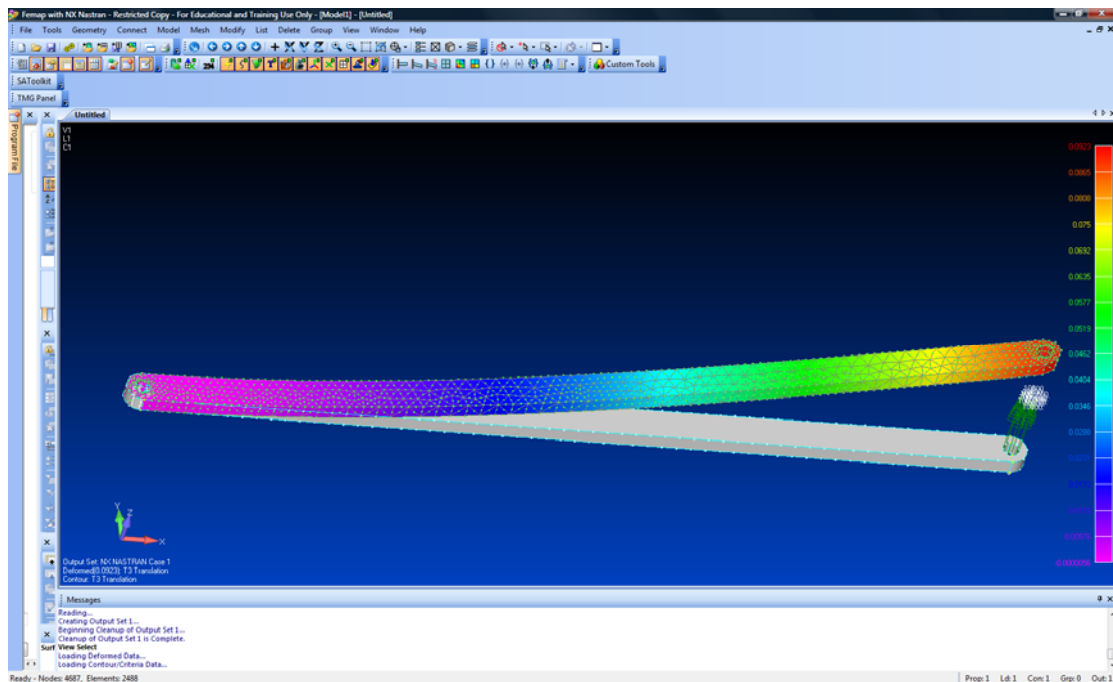


Imagen 4.2.1.2: Deformación eslabón doble

Se concluye, a partir de estos análisis, que **la deformación máxima bajo una misma excitación dinámica será un 87,2 % menor si se sustituyen los dos eslabones unidos, por un único eslabón con el doble de espesor que los anteriores.**

4.2.2 El modelo simplificado

FEMAP fue la herramienta informática elegida para el presente proyecto con el fin de realizar análisis estáticos de desplazamientos sobre un conjunto de piezas modeladas y ensambladas con SOLID EDGE ST. Este conjunto de piezas, que representan fielmente el modelo real de PASIBOT, resultó demasiado complejo para la capacidad de los ordenadores empleados. Por esto, se decidió crear un modelo de PASIBOT simplificado, siguiendo la metodología expuesta en el apartado 3.2.2. Este modelo permitiría realizar tantas simulaciones como se quisiera, sometiendo al sistema mecánico a diferentes estados de carga y condiciones de contorno, o “probar” el comportamiento de la estructura con diferentes materiales y así conocer su resistencia real sin necesidad de construir numerosos y costosos prototipos físicos. Una vez creado el modelo simplificado, se realizaron los cálculos que permitirían sustituir el resto del sistema mecánico por una carga axial y un momento. El proceso de cálculo para la obtención de estos dos valores sustitutivos fue el siguiente:

1. Obtener en SOLID EDGE ST cuánto pesa el resto del robot. Este peso será la fuerza que soporta el modelo simplificado en dirección vertical.

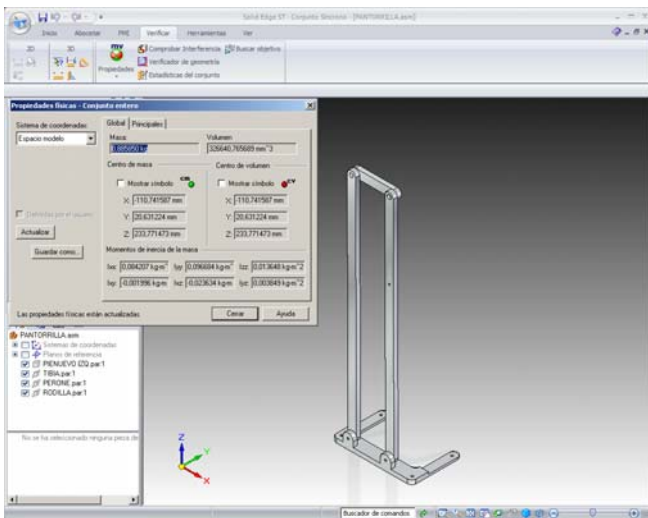


Imagen 4.2.2.1: Peso modelo simplificado

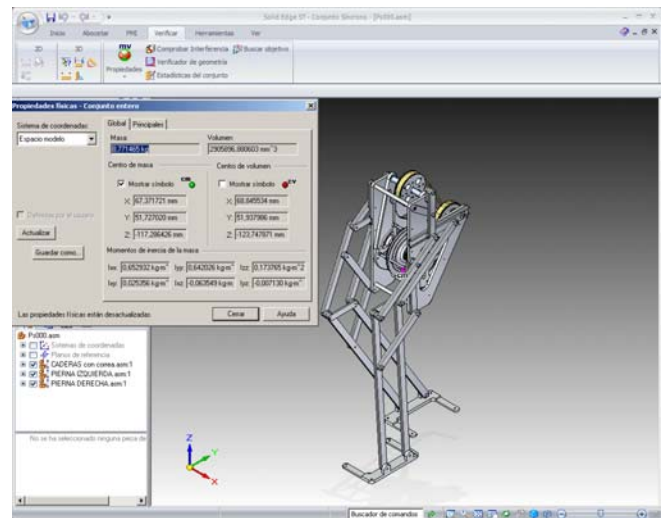


Imagen 4.2.2.2: Peso PASIBOT

$$\text{Peso PASIBOT} - \text{Peso modelo simplificado} = (8.771465 - 0.88585) \text{ kg} = 7.89 \text{ kg}$$

$$F = 7.89 \text{ kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 77.4 \text{ N}$$

2. Una vez obtenido el valor de la fuerza, se determina la distancia de aplicación de la misma para calcular el momento flector que soporta el modelo.

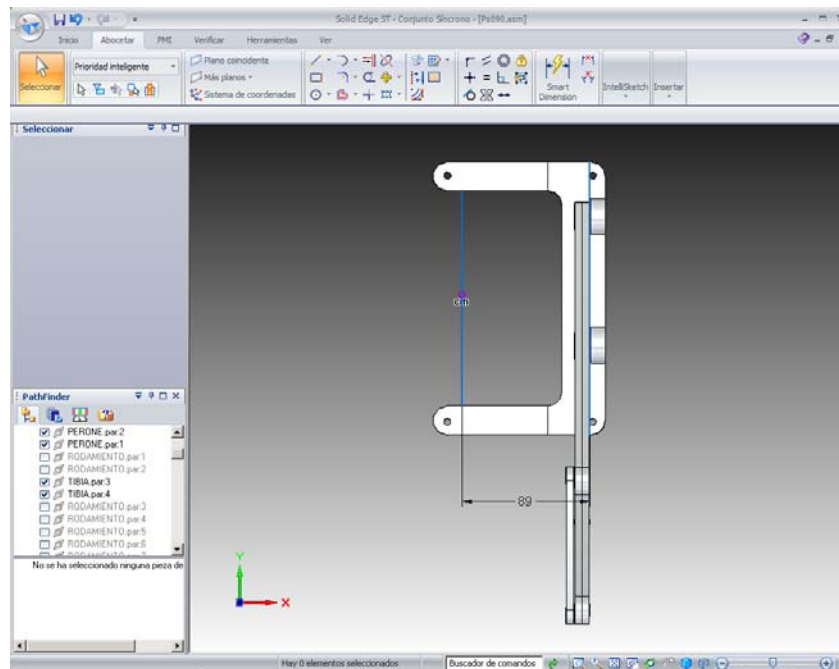


Imagen 4.2.2.3: Distancia de aplicación del peso

$$\text{Momento} = \text{Fuerza} \times \text{Distancia}$$

$$\text{Momento} = 77.4\text{N} \times 0.089\text{m} = 6.9\text{N.m}$$

$$\boxed{\text{Fuerza} = 77.4\text{N}; \text{Momento} = 6.9\text{N.m}}$$

Estos valores de fuerza y momento flector, junto con la acción de la gravedad, forman el sistema de cargas que se han de aplicar sobre el modelo simplificado para realizar los análisis estáticos en FEMAP. El primero de estos análisis consiste en aplicar estas cargas y observar qué valores de deformación adquieren los eslabones. Este primer análisis es de vital importancia en el presente proyecto porque determina qué parte de la deformación total es de flexión. En una primera aproximación, FEMAP no contempla las holguras en las uniones, por lo que los valores obtenidos son debidos únicamente a la flexión de los eslabones. La unidad de medida de los valores de deformación que se muestran en las imágenes 4.2.2.4 y 4.2.2.5 es el metro.

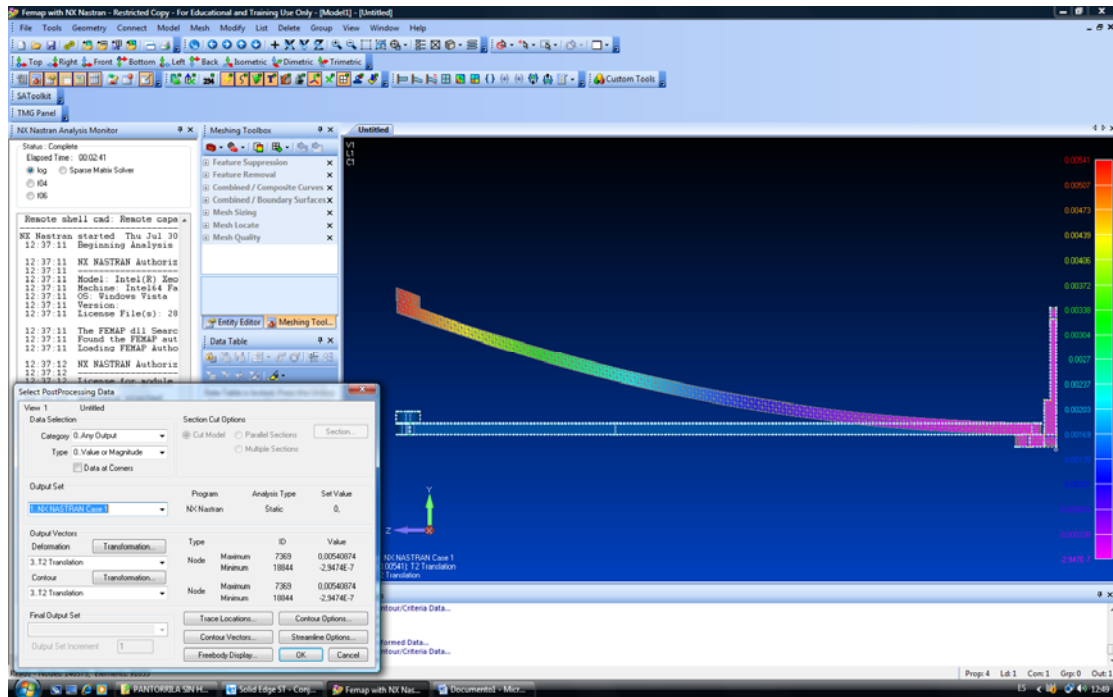


Imagen 4.2.2.4: Vista lateral de la deformación en los eslabones

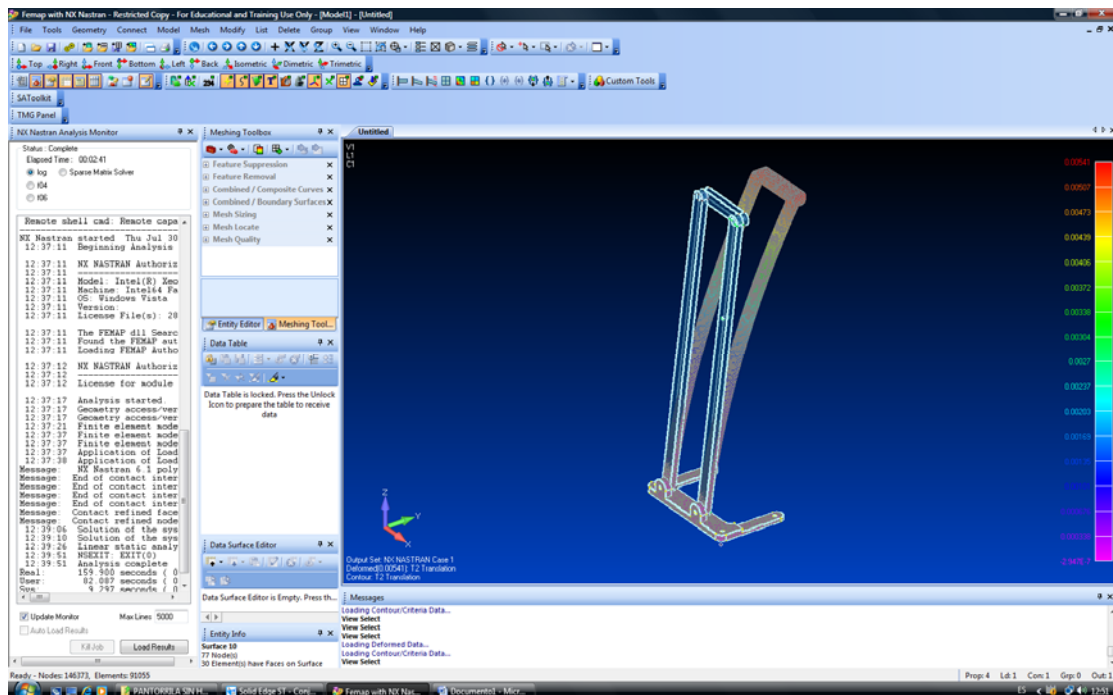


Imagen 4.2.2.5: Vista isométrica de la deformación en los eslabones

Los resultados de los análisis determinan una **deformación máxima debida a flexión de 5.4 mm**. No se puede afirmar que éste sea realmente el valor total del desplazamiento debido a la elasticidad ya que, aunque estos eslabones son los que más se deforman, también existirá una pequeña flexión en algún otro eslabón.

4.2.3 Modelo simplificado con mayor rigidez

Con el fin de reducir los valores de deformación obtenidos en los análisis anteriores se propuso aumentar la rigidez. Para conseguir implementar esta mejora se diseñaron unos nuevos eslabones con un nuevo perfil. Estos nuevos eslabones sustituirían a los dos eslabones principales del modelo simplificado reduciendo de manera notable la flexión. Para poder comprobar que la teoría sobre el nuevo perfil funcionaría según lo previsto, se realizó un análisis en FEMAP. Las cargas aplicadas sobre el modelo son las mismas que en el apartado anterior, por lo que los resultados son directamente comparables. Las imágenes 4.2.3.1 y 4.2.3.2 muestran los resultados obtenidos.

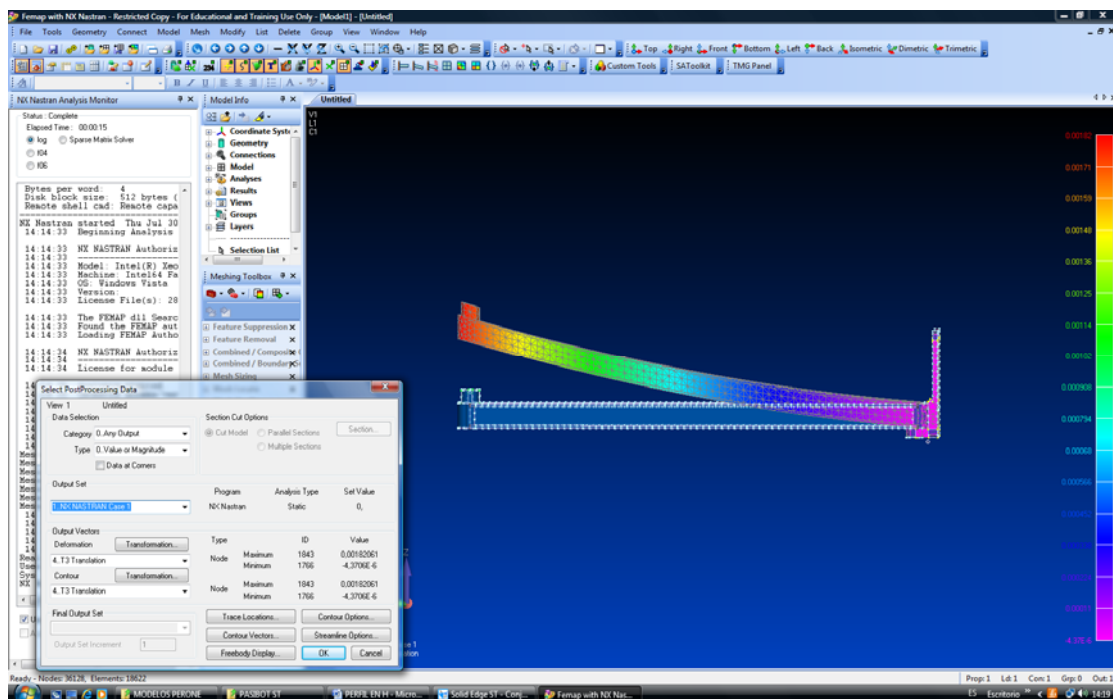


Imagen 4.2.3.1: Modelo simplificado con eslabones H

Modelado y simulación del robot PASIBOT. Estudio de la rigidez y mejora en la prevención del vuelco lateral.

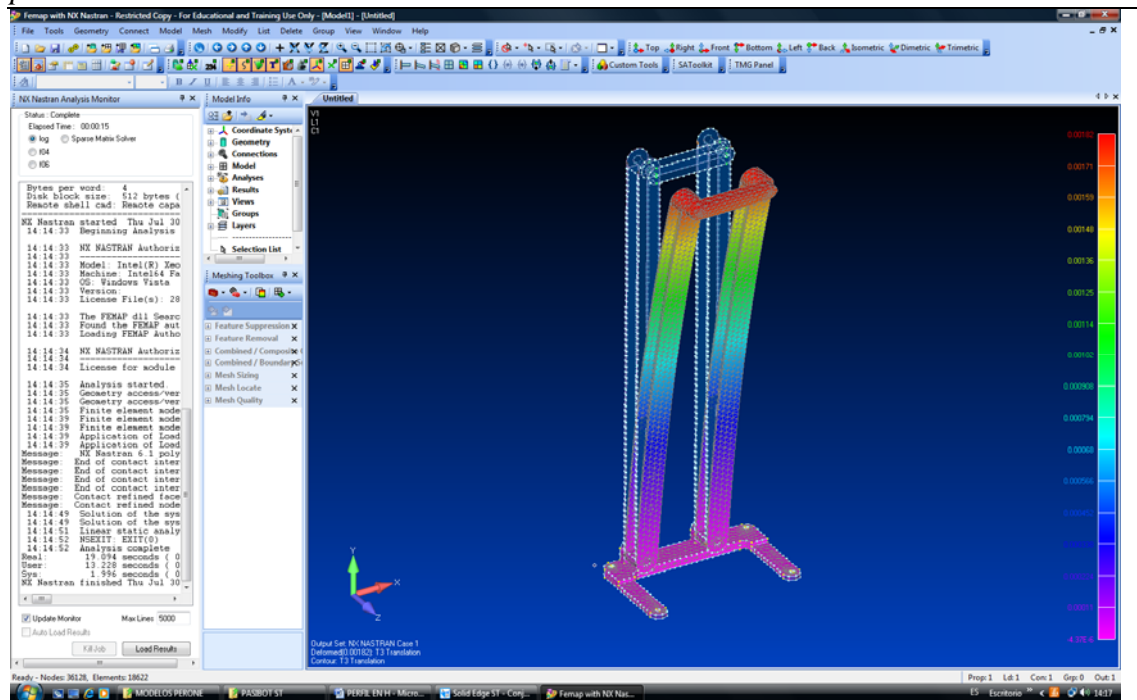


Imagen 4.2.3.2: Vista isométrica del modelo simplificado con eslabones H

Los análisis realizados determinan **una deformación máxima para este nuevo modelo de eslabón de 1.8 mm. Esto supone una reducción de casi un 70% con respecto al modelo actual.** Este análisis valida la teoría del nuevo perfil ya que consigue un porcentaje de reducción bastante elevado.

4.2.4 Pie de apoyo

La unión entre el pie de apoyo y el resto del sistema mecánico es donde se localizan las mayores holguras entre eslabones del PASIBOT. Estas holguras provienen de un desalineamiento axial entre los ejes de los sólidos. Cuantificar con exactitud el desequilibrio generado por estas holguras resultaba un problema ya que no se disponía de los instrumentos de medida apropiados para ello. Sin embargo, se estimó experimentalmente su valor asemejando el caso a un triángulo rectángulo y empleando relaciones trigonométricas. Para medir el ángulo de desalineamiento entre los sólidos se utilizó un transportador de ángulos. Este aparato de medida tiene una precisión de 0.5° . En la imagen 4.2.4.1 se ilustra la situación real de la holgura en la unión del pie y se indica que el valor del ángulo medido es de 3° .

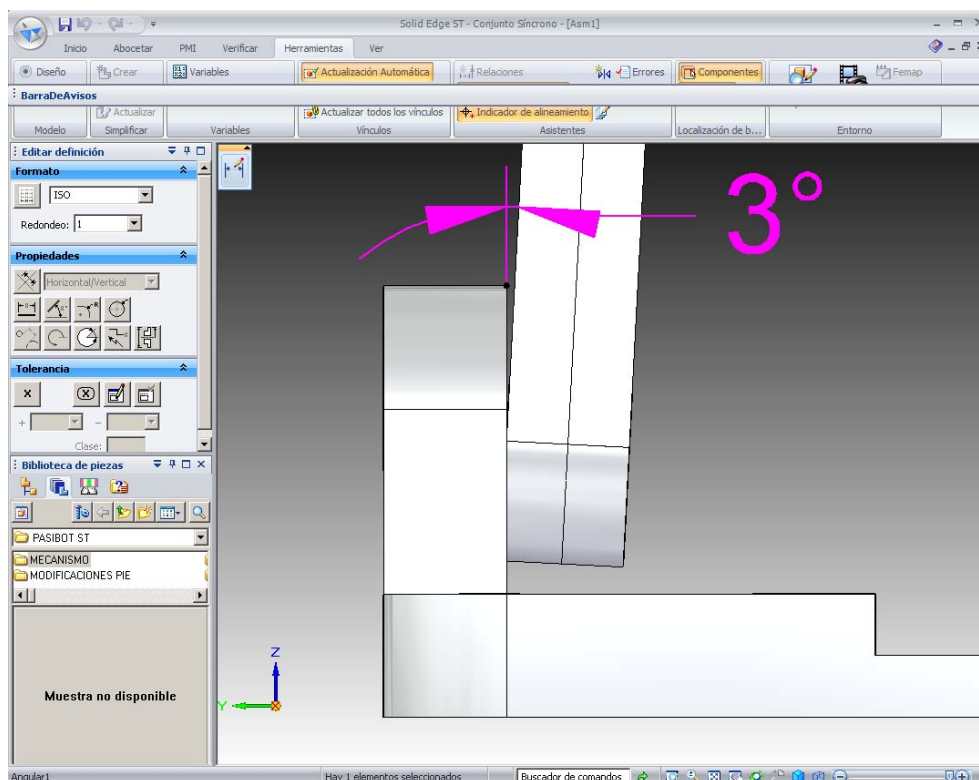
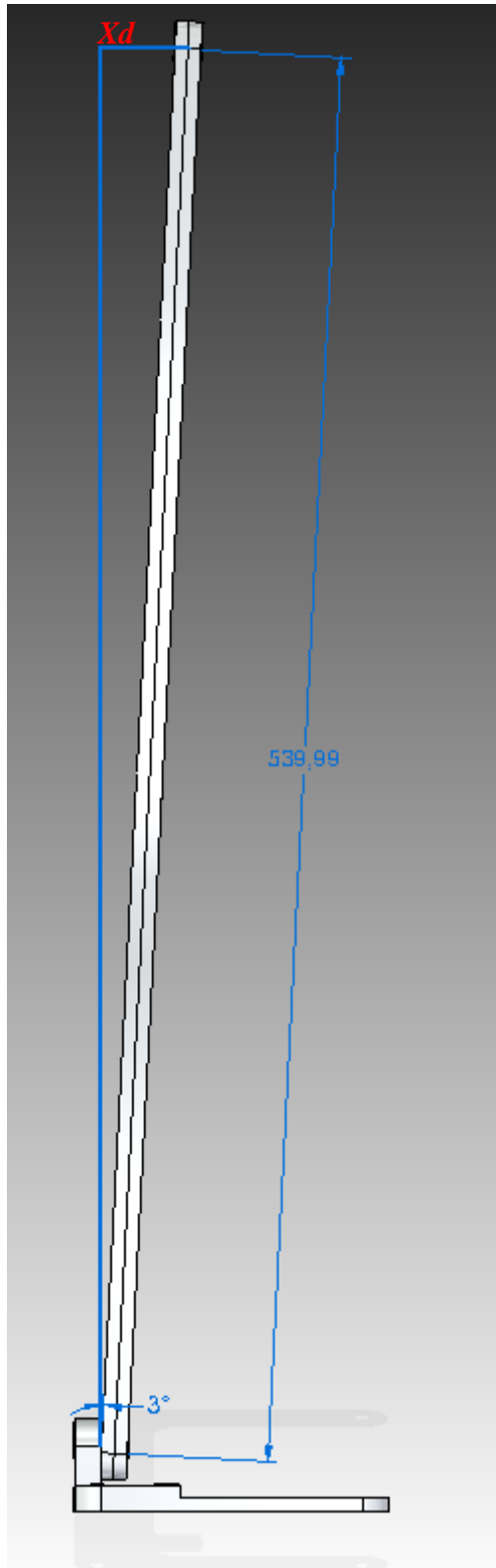


Imagen 4.2.4.1: Holgura en la unión del pie

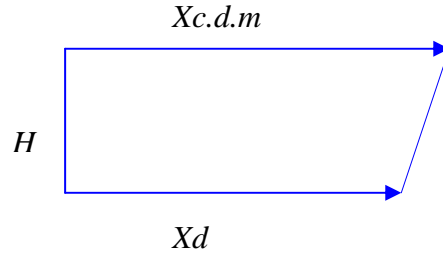
Una vez conocido el ángulo de desalineamiento es sencillo obtener mediante relaciones trigonométricas el desplazamiento del extremo opuesto del eslabón. Si se conoce el desplazamiento del extremo del eslabón se conoce el desplazamiento del c.d.m.



$$X_d \approx \text{seno} \theta \times \text{longitud del eslabón}$$

$$X_d \approx \text{seno}(3 \pm 0,5)^\circ \times 540 \text{ mm}$$

$$X_d = (28,5 \pm 5) \text{ mm}$$



$$H \approx \text{Distancia al c.d.m.} \approx 17,51 \text{ mm}$$

$$X_{c.d.m.} = X_d + H \times \text{seno}(3^\circ)$$

$$X_{c.d.m.} = (29 \pm 5) \text{ mm}$$

Según este cálculo trigonométrico y teniendo en consideración el margen de error debido a la precisión del instrumento de medida, **la holgura en el pie de apoyo provoca un desplazamiento del c.d.m. de entre 24 y 34 mm.** Para evitar este fenómeno se diseñó un nuevo modelo de pie que redujese el ángulo de desalineamiento a 0° . Este nuevo modelo, que consiste en duplicar el apoyo del pie de cada articulación, impide físicamente que los eslabones se inclinen. Este nuevo comportamiento se ilustra en las imágenes 4.2.4.3 y 4.2.4.4.

Imagen 4.2.4.2: Desplazamiento del extremo del eslabón

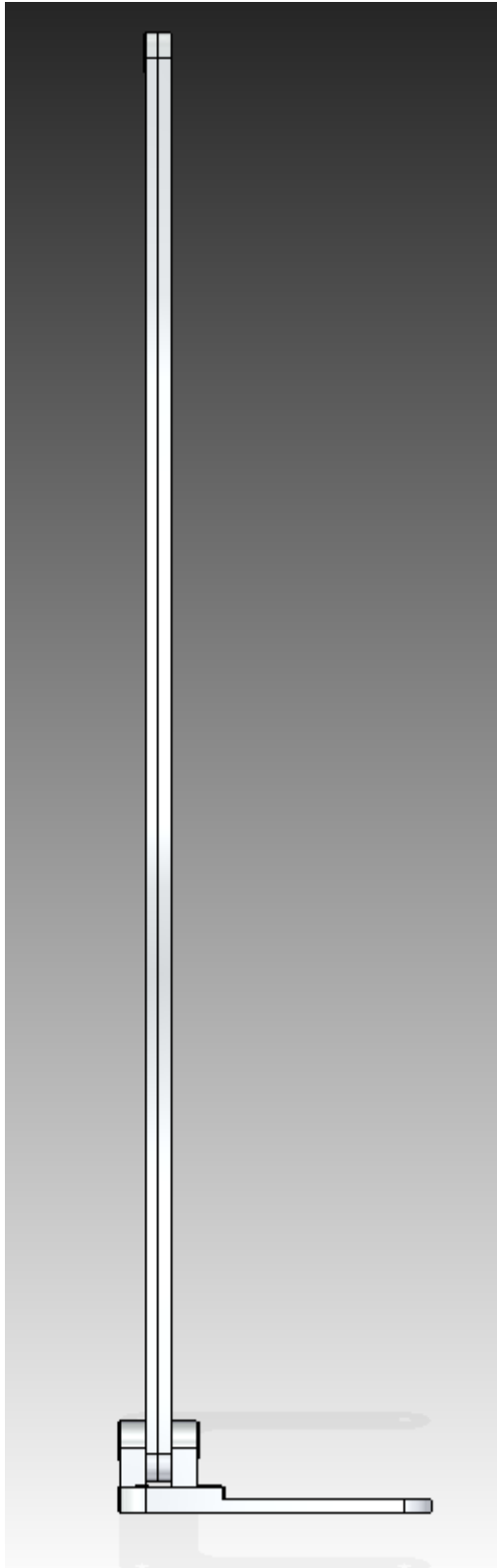


Imagen 4.2.4.3: Unión con nuevo modelo de pie

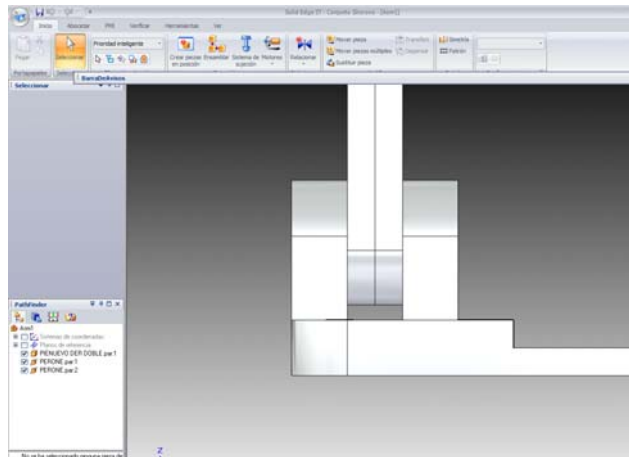


Imagen 4.2.4.4: Vista ampliada de la nueva unión

Como se puede observar en las imágenes, **el nuevo modelo de pie conseguirá reducir drásticamente el desalineamiento en la unión** y, por consiguiente, el único desplazamiento considerable que sufre el c.d.m. será el debido a la flexión de los eslabones. Por otra parte, este nuevo modelo ayudará a evitar la aparición de holguras entre los rodamientos y los agujeros roscados de los sólidos. Estos agujeros, donde están introducidos los rodamientos, son zonas de concentración de tensiones. Cuando el robot alcance elevados ciclos de funcionamiento, aparecerán fenómenos de fatiga debido a las cargas dinámicas cíclicas aplicadas sobre él. Este fenómeno de fatiga provocará una cierta deformación plástica que dará lugar a holguras entre el rodamiento y su agujero.

Modelado y simulación del robot PASIBOT. Estudio de la rigidez y mejora en la prevención del vuelco lateral.

El análisis de tensiones realizado sobre el modelo original del pie de PASIBOT se muestra en la imagen 4.2.4.4. En la siguiente imagen se observan los resultados obtenidos al someter al mismo análisis tensional al nuevo modelo. Los recuadros a la derecha de las imágenes determinan los valores de tensión en MPa.

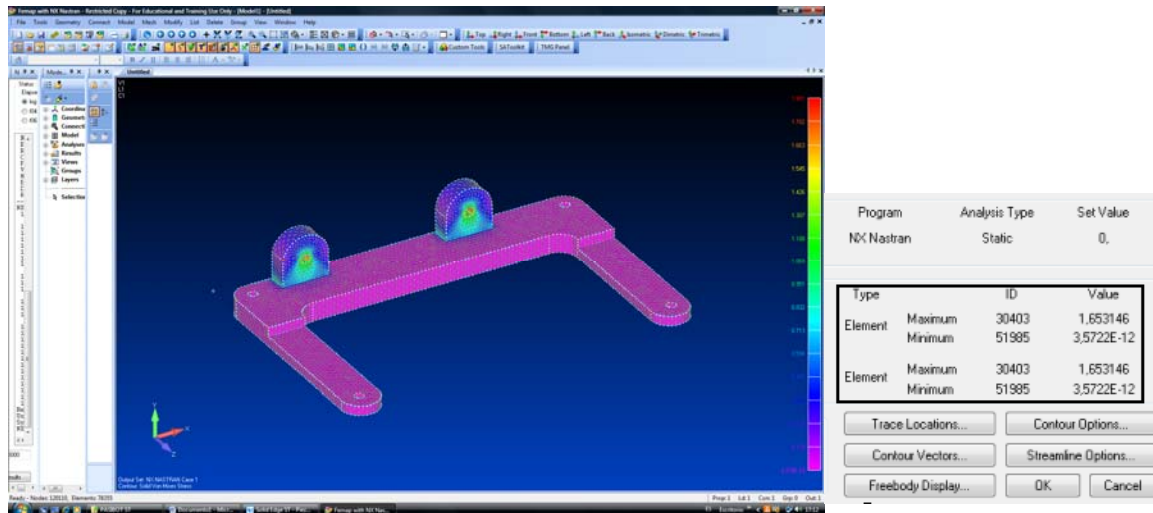


Imagen 4.2.4.5: Análisis tensional sobre pie original

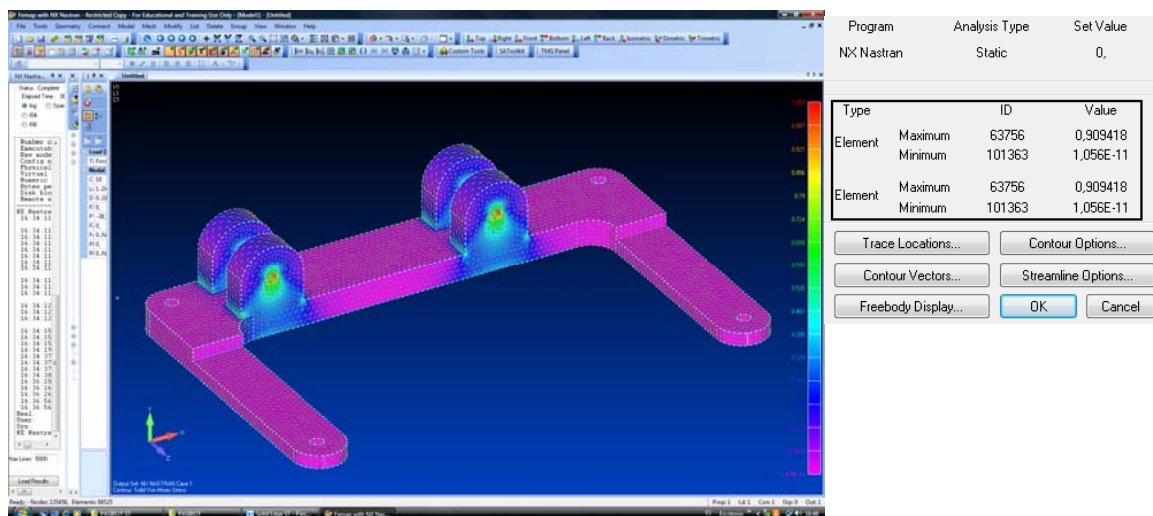


Imagen 4.2.4.6: Análisis tensional sobre pie nuevo

Las tensiones máximas generadas con el nuevo modelo de pie son algo más de la mitad de las generadas con el original. Por esto, gracias al nuevo pie el fenómeno de fatiga aparecerá a unos ciclos de funcionamiento mucho mayores.

Capítulo V: Conclusiones y trabajos futuros



En el presente Proyecto Fin de Carrera “Modelado y simulación del robot PASIBOT. Estudio de la rigidez en la prevención del vuelco lateral” se han expuesto dos métodos de mejora independientes para evitar el vuelco del robot PASIBOT. Estas mejoras han sido implantadas en un modelo virtual creado en SOLID EDGE ST para el presente proyecto. Con el fin de evaluar la validez y la fiabilidad de las mejoras, se han realizado análisis estáticos en el programa FEMAP. Para poder realizar estos análisis se ha creado un modelo virtual simplificado que posee las características dinámicas del modelo original. Al finalizar este trabajo se establecen las conclusiones extraídas de los resultados de los análisis.

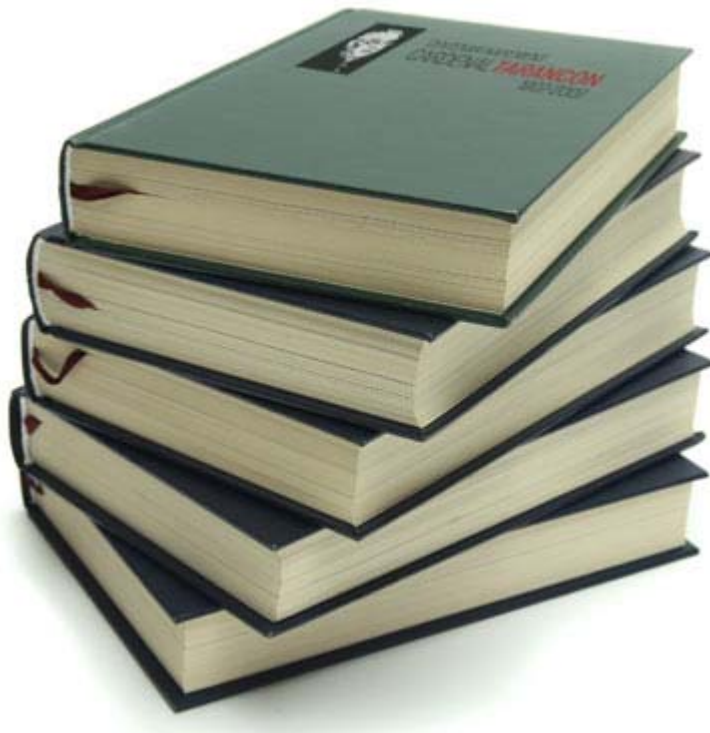
- En primer lugar, se concluye que el desequilibrio producido por el mecanismo corrector compensará el movimiento natural del c.d.m. de PASIBOT. Esta compensación evitará que el c.d.m. se salga de la planta del pie y por consiguiente, que el robot vuelque.
- Asimismo, se concluye que bajo un mismo sistema de cargas, la deformación máxima debida a la flexión en la tibia y el peroné de PASIBOT será un 87% menor si se coloca un eslabón de doble espesor.
- La colocación de eslabones con el nuevo perfil hará reducir la deformación a flexión en un 70 % con respecto al eslabón de doble espesor.
- De igual modo, se establece que el desplazamiento del c.d.m del PASIBOT es de 35 mm. Este desplazamiento es debido a dos causas: la deformación en los eslabones y las holguras de las uniones.
- De los 35 mm de desplazamiento calculados experimentalmente, se concluye que sin existir ningún tipo de holgura en las uniones, tan solo 5mm son debidos a la flexión de los eslabones.
- Con respecto a las uniones, se determina que las holguras presentes en las articulaciones del pie en el prototipo actual de PASIBOT son las principales causas de su inestabilidad, por lo que su eliminación resolvería el problema.

- El diseño del nuevo pie reduce drásticamente la aparición de las holguras. Por tanto, el desplazamiento que sufra el c.d.m. será debido únicamente a la flexión en los eslabones. Este desplazamiento por flexión es menor que el máximo admisible, 15 mm, por lo que alcanzamos el objetivo principal del presente proyecto: evitar el vuelco lateral del robot PASIBOT.

Una vez extraídas las conclusiones de los análisis realizados sobre el modelo virtual, se enumeran a continuación posibles líneas de desarrollo encaminadas a dotar al robot PASIBOT de un funcionamiento más óptimo.

- **Reducir el peso del robot.** Este parámetro es de vital importancia para el funcionamiento del robot, como se ha visto en el desarrollo del proyecto. Reducir este valor implicaría una menor deformación en los eslabones y las uniones estarían menos solicitadas dinámicamente, por lo que las holguras también serían menores. Para realizar esta propuesta habría que rediseñar partes del robot y/o cambiar los materiales de fabricación.
- **Descender el c.d.m..** Esta propuesta también implica un rediseño de algunas partes del robot, como por ejemplo la cadera. Cuanto más próximo se encuentre el c.d.m. del suelo, mayor será su estabilidad, tanto longitudinal como transversal.
- **Estudio de rodamientos.** Analizar de manera rigurosa el comportamiento de los rodamientos colocados en el PASIBOT. Estudiar los desalineamientos generados entre el rodamiento y la superficie del eslabón, así como los movimientos relativos entre piezas del propio rodamiento

Bibliografía



Páginas Web:

[1]

<http://laroboticaronal.blogspot.com/>

(Última visita: 21/3/09)

[2]

<http://www.miportal.edu.sv/sitios/operacionred2008/OR08021630/index.html>

(Última visita: 21/3/09)

[3]

<http://html.rincondelvago.com/biomecanica-de-la-marcha.html>

(Última visita: 14/4/09)

[4]

<http://mimosa.pntic.mec.es/jgomez53/matema/conocer/chebyshev.htm>

(Última visita: 16/4/09)

[5]

<http://es.wikipedia.org/wiki/Pant%C3%B3grafo>

(Última visita: 16/4/09)

[6]

<http://www.skf.com/portal/skf/home/products?contentId=095390&lang=es>

(Última visita: 7/5/09)

[7]

<http://www.printedmotorworks.com/electric-motor-range/gp-series-printed-motor/>

(Última visita: 7/5/09)

[8]

<http://solid-edge.es/>

(Última visita: 20/6/09)

[9]

<http://www.iberisa.com/nxnastran/femap.html>

(Última visita: 20/6/09)

[10]

http://webdelprofesor.ula.ve/arquitectura/jorgem/principal/guias/modulo_iii.pdf

(Última visita: 4/7/09)

[11]

<http://www.uc3m.es/>

(Última visita: 2/10/09)

[12]

<http://www.monografias.com>

(Última visita: 8/7/09)

Publicaciones:

VERA LUNA, Pedro: *Biomecánica de la marcha humana normal y patológica*, Valencia, editorial IBV, 1999.

PFC: HERNÁNDEZ MOLINA, Carlos: *Análisis del vuelco lateral del robot PASIBOT. Diseño de un mecanismo compensador*, Universidad Carlos III, Madrid, 2009.

PFC: CORRAL ABAD, Eduardo: *Análisis mecánico del robot bípedo "PASIBOT"*. Universidad Carlos III, Madrid, 2009.